

**VERIFICAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO  
NO CONCRETO DA UHE DE MASCARENHAS**

**ANDERSON FINAMORE SABBAG**

**CURITIBA**

**2003**

**ANDERSON FINAMORE SABBAG**

**VERIFICAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO  
NO CONCRETO DA UHE DE MASCARENHAS**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.**

**Orientador: Prof. Dr Vladimir Antonio Paulon**

**CURITIBA**

**OUTUBRO 2003**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

ANDERSON FINAMORE SABBAG

### **VERIFICAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO NO CONCRETO DA UHE DE MASCARENHAS**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon  
Setor de Engenharia Civil, UNICAMP

Prof. Dr. Marcos Antônio Marino  
Departamento de Construção Civil, UFPR

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Departamento de Engenharia Civil, UFRGS

Curitiba, 17 de outubro de 2003.

## DEDICATÓRIA

*A minha futura esposa, Flávia, que em todos os momentos deste trabalho esteve ao meu lado... pelo carinho e incentivo permanentes.*

*Aos meus pais, Aloyr e Maria Ângela.*



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon, por ter aceitado meu projeto, pelo apoio, acompanhamento e pela valiosa revisão do estudo.

Ao Laboratório de Materiais e Estruturas do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LAME-LACTEC, pelo financiamento deste trabalho, por ter me dado espaço e apoio para desenvolvimento dos experimentos e a todos os funcionários, que contribuíram para realização da pesquisa.

Ao Professor Paulo Roberto Chamecki, a Eng. Patrícia H. Pedrozo e ao Eng Ruy Dikran por terem me convidado a participar da pesquisa que resultou neste trabalho.

A Espírito Santo Centrais Elétricas S. A., ESCELSA, que forneceu os materiais para desenvolvimento do estudo, em especial ao Engº. José Augusto Sava e a Eng. Ângela Campagnaro

Ao amigo, João Luís Alves, pelo companheirismo nas viagens e dedicação nos momentos que precisei para desenvolver o programa experimental.

Aos professores, funcionários e colegas do Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, da UFPR, em especial a amiga, Aline M. Kormann, por ter me indicado a participar desta pesquisa.

Ao pessoal do LAME, Betina, Caroline, Waleska, Ezequias, Marcelo, Anivo, Amauri, Gilson, Rosane, Cíntia, Eustáquio, Francisco, que contribuíram no desenvolvimento dos ensaios de laboratório, em especial a Regiane Wosniak, que me auxiliou em várias etapas do trabalho.

Ao professores, José Freitas e Mônica Tabor Druszcz, que me apoiaram nos momentos finais deste trabalho.

À professora, Lia Salvadore, pela revisão feita na dissertação.

A todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

# SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS .....  | vii  |
| LISTA DE TABELAS .....  | xi   |
| RESUMO .....  | xii  |
| ABSTRACT .....  | xiii |
| 1 INTRODUÇÃO.....   | 1    |
| 1.1 Objetivos da Pesquisa .....   | 2    |
| 1.2 A Usina Hidrelétrica de Mascarenhas.....  | 3    |
| 1.3 Estrutura da Dissertação.....   | 4    |
| 2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA) .....  | 6    |
| 2.1 OCORRÊNCIA DO FENÔMENO RAA EM OBRAS DE BARRAGENS .....  | 6    |
| 2.1.1 Panorama Nacional.....  | 6    |
| 2.1.2 Panorama Internacional.....   | 8    |
| 2.2 MECANISMOS DE EXPANSÃO DA RAA .....   | 9    |
| 2.3 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....  | 12   |
| 2.3.1 Reação Álcali- Sílica .....   | 12   |
| 2.3.2 Reação Álcali-Silicato .....  | 16   |
| 2.3.3 Reação Álcali-Carbonato:.....   | 18   |
| 2.4 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DA RAA .....  | 20   |
| 2.4.1 Análise Petrográfica - ASTM C-295 (1990); ASTM C-856 (1995); ABNT NR-7389: .....  | 20   |
| 2.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura.....  | 21   |
| 2.4.3 Ensaio Acelerado – ASTM C- 1260 (2001): .....   | 22   |
| 2.4.4 Ensaio Químico - ABNT BR-9774 (1987); ASTM C-289 (1994): .....  | 22   |
| 2.4.5 Ensaio das Barras de Argamassa - ABNT NBR-9773(1987); ASTM-C-227 (1990): .....  | 23   |
| 2.4.6 Ensaio do Prisma de Concreto – ASTM C-1293 (1995): .....  | 24   |
| 2.4.7 Ensaio do Cilindro de Rocha - ABNT NBR-10340 (1988); ASTM C-586 (1992): .....   | 25   |
| 2.4.8 Ensaio Térmico (Osipov):.....   | 25   |
| 2.4.9 Ensaio GEL-PAT:.....  | 26   |
| 2.4.10 Ensaio em Autoclave:.....  | 26   |
| 2.4.11 Ensaio de Contraste Químico – Acetato de Urânio. ....  | 26   |
| 2.4.12 Ensaio CSA A –23.2 – 26A – Método Químico Canadense .....  | 26   |
| 2.4.13 Ensaio CSA A 23.2 – 25A – Método Canadense das Barras.....   | 27   |
| 2.4.14 Determinação do Índice de Deterioração do Concreto: .....  | 27   |
| 2.4.15 Avaliação da Eficiência de Materiais Pozolânicos – NBR 12.651 (1992) e ASTM C-441 (1996) : .....   | 27   |
| 2.5 FATORES QUE INTERFEREM NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....   | 28   |
| 2.5.1 Teor de Alcalis do Cimento .....  | 28   |
| 2.5.2 Agregados.....  | 30   |
| 2.5.3 Umidade .....   | 33   |
| 2.5.4 Temperatura.....  | 34   |
| 2.5.5 Tensões de compressão .....   | 34   |
| 2.5.6 Tempo.....  | 34   |
| 2.6 EFEITO DE ADIÇÕES NA REDUÇÃO DA EXPANSÃO DEVIDO À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....   | 35   |
| 2.6.1 Adições Químicas.....   | 35   |
| 2.6.2 Adições Minerais.....   | 38   |
| 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....  | 43   |
| 3.1 METODOLOGIA .....   | 43   |
| 3.1.1 Inspeção da barragem e extração dos corpos-de-prova. ....   | 43   |
| 3.1.2 Preparação dos corpos-de-prova.....   | 50   |
| 3.1.3 Ensaios de laboratório com os corpos-de-prova extraídos da UHE Mascarenhas. ....  | 52   |
| 3.1.4 Análise comparativa entre o ensaio de reatividade potencial realizado com barras (ASTM C-1260/01) e o método de reatividade realizado com corpos-de-prova cilíndricos. .... | 58   |
| 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....  | 60   |
| 4.1 Comparação entre o ensaio de reatividade potencial realizado com barras (ASTM C-1260/01) e o método de reatividade realizada com corpos-de-prova cilíndricos.....             | 60   |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.1.1 | Comparação 01 (vidro Pyrex).....  | 60  |
| 4.1.2 | Comparação 02 (areia reativa).....  | 63  |
| 4.2   | Ensaio de reatividade potencial através do método de imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH), água deionizada e estufa, todos a 80°C..... | 66  |
| 4.3   | Ensaio de resistência à compressão axial - NBR 5739/94.....   | 75  |
| 4.4   | Ensaio de módulo de elasticidade - NBR 8522/84.....   | 76  |
| 4.5   | Análise Petrográfica.....   | 78  |
| 4.6   | Microscopia Eletrônica de Varredura.....  | 82  |
| 5     | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....   | 97  |
| 5.1   | CONCLUSÕES.....   | 97  |
| 5.2   | SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....   | 99  |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 100 |

## LISTA DE FIGURAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| FIGURA 1.  | PROCESSO DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO. (FERRARIS 2000, APUD VALDUGA 2002).....  | 11 |
| FIGURA 2.  | ESTRUTURA TETRAÉDRICA DA SÍLICA (HASPARYK, 1999).....  | 12 |
| FIGURA 3.  | ESTRUTURA DA SÍLICA NO PLANO, MOSTRA DA SUPERFÍCIE NÃO HIDRATADA (PAULON, 1981)..  | 13 |
| FIGURA 4.  | SUPERFÍCIE HIDRATADA DA SÍLICA (PAULON, 1981) .....  | 13 |
| FIGURA 5.  | PARTÍCULA DE SÍLICA REATIVA ENVOLTA COM PASTA DE CIMENTO (PAULON, 1981).....   | 14 |
| FIGURA 6.  | ATAQUE DOS ÍONS $\text{OH}^-$ AO GRUPO SILANOL (TURRIZIANI, 1986; HAPARYK, 1999).....  | 15 |
| FIGURA 7.  | RUPTURA DAS LIGAÇÕES DO GRUPO SILOXANO PELOS ÍONS HIDROXILAS (TURRIZIANI, 1986; HAPARYK, 1999) .....   | 16 |
| FIGURA 8.  | CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO ANTES (A) E DEPOIS DA REAÇÃO (B) (VAN AARDT & VISSER, 1977; HASPARYK, 1999). .....   | 18 |
| FIGURA 9.  | CLASSIFICAÇÃO REATIVA DO AGREGADO (NBR 9774, 1987) .....   | 23 |
| FIGURA 10. | CLASSIFICAÇÃO DO POTENCIAL DA REAÇÃO COM RELAÇÃO ENTRE A QUANTIDADE DE ÁLCALIS E O CONSUMO DE CIMENTO NO CONCRETO (OBERHOLSTER, ET AL 1983) .....                          | 29 |
| FIGURA 11. | INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DE AGREGADOS REATIVOS SOBRE A EXPANSÃO DO CONCRETO (HOBBS, 1988). .....  | 31 |
| FIGURA 12. | EXPANSÃO DE AMOSTRAS CONTENDO $\text{LiOH}$ (RAMACHANDRAN, 1998) .....   | 37 |
| FIGURA 13. | CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DOS FUROS (GALERIA DE INSPEÇÃO). .....  | 44 |
| FIGURA 14. | ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DO EXTENSÔMETRO MÚLTIPLO 01 .....  | 45 |
| FIGURA 15. | ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS MÚLTIPLOS 02, 03 E 04. ....  | 45 |
| FIGURA 16. | MONTAGEM DO EQUIPAMENTO PARA PERFURAÇÃO DO FURO 01. NA FIGURA A, NOTA-SE O PRÉ-FURO, EXECUTADO COM EXTRATORA DE MENOR PORTE. EM B, TEM-SE UMA VISÃO MELHOR DO FURO 01. ... | 46 |
| FIGURA 17. | EXTRAÇÃO DE CORPOS-DE-PROVA NA GALERIA DE INSPEÇÃO DA BARRAGEM. ....   | 46 |
| FIGURA 18. | UMIDADE E LIXIVIAÇÃO NOS LOCAIS DE RETIRADA DE TESTEMUNHOS DE CONCRETO. ....   | 47 |
| FIGURA 19. | PRESENÇA DE LIXIVIAÇÃO E PRODUTOS DERIVADOS DE CORROSÃO NA GALERIA DE DRENAGEM. ....   | 47 |
| FIGURA 20. | MARCAÇÃO DOS LOCAIS DE EXTRAÇÃO DE CONCRETO.....   | 47 |
| FIGURA 21. | INSTALAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE EXTRAÇÃO E INÍCIO DA RETIRADA DOS CORPOS-DE-PROVA .....   | 48 |
| FIGURA 22. | PROCESSO DE RETIRADA DO CONCRETO APÓS A PERFURAÇÃO COM EXTRATORA.....  | 48 |
| FIGURA 23. | RETIRADA DO TESTEMUNHO DE CONCRETO .....   | 48 |
| FIGURA 24. | A) SECAGEM SUPERFICIAL DO CONCRETO EXTRAÍDO. B) IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ACORDO COM O LOCAL DE EXTRAÇÃO E A PROFUNDIDADE DE RETIRADA. ....                            | 49 |
| FIGURA 25. | EMBALAGEM EM FILME PLÁSTICO DO CONCRETO PARA PRESERVAR A UMIDADE INTERIOR E ACONDICIONAMENTO DO CONCRETO NO RECIPIENTE DE TRANSPORTE. ....                                 | 49 |
| FIGURA 26. | PREPARAÇÃO DO GRAUTE E PREENCHIMENTO DO FURO DEIXADO PELA EXTRAÇÃO DO CONCRETO. ....   | 50 |
| FIGURA 27. | CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS E IDENTIFICAÇÃO. ....  | 50 |
| FIGURA 28. | CORPOS-DE-PROVA SENDO SERRADOS. ....   | 51 |
| FIGURA 29. | CORPOS-DE-PROVA SENDO RETIFICADOS. ....  | 51 |
| FIGURA 30. | CORPOS-DE-PROVA PREPARADOS. ....   | 51 |
| FIGURA 31. | MICRÔMETRO COM LEITURA DIGITAL. ....   | 52 |
| FIGURA 32. | BANHEIRA COM ÁGUA A 80 °C E RECIPIENTES COM ÁGUA DEIONIZADA E SOLUÇÃO DE $\text{NaOH}$ . ....  | 53 |
| FIGURA 33. | RECIPIENTES COM CP'S EM SOLUÇÃO DE $\text{NaOH}$ E ÁGUA DEIONIZADA E EM ESTUFA A 80 °C.....  | 53 |
| FIGURA 34. | A) SUPORTE PARA APOIAR CORPOS-DE-PROVA PARA A REALIZAÇÃO DE LEITURAS. B) LEITURA REALIZADA COM MICRÔMETRO EM CORPO-DE-PROVA IDENTIFICADO.....                              | 53 |
| FIGURA 35. | MICROSCÓPIO ÓPTICO DE LUZ TRANSMITIDA, LABORATÓRIO DE PETROGRAFIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - LAMIR.....   | 54 |
| FIGURA 36. | LÂMINAS DELGADAS COM APROXIMADAMENTE 30 $\mu\text{m}$ DE ESPESSURA.....  | 54 |
| FIGURA 37. | MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA.....   | 55 |
| FIGURA 38. | PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA MICROSCOPIA. ....   | 56 |
| FIGURA 39. | CORPOS-DE-PROVA SENDO CAPEADOS.....  | 56 |
| FIGURA 40. | A) ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL (PRENSA DE 30 TF ). B) CORPOS-DE-PROVA ROMPIDOS. ....  | 57 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| FIGURA 41. | COLAGEM DO STRAIN GAGE COM ADESIVO ESTRUTURAL.....  | 57 |
| FIGURA 42. | A) PONTE DE LEITURA. B) PRENSA DE 10 TF COM CP LIGADO À PONTE. ....   | 58 |
| FIGURA 43. | GRÁFICO DE EXPANSIBILIDADE X TEMPO (ASTM C-1260/01) – VIDRO PYREX. ....   | 61 |
| FIGURA 44. | GRÁFICO DE EXPANSIBILIDADE X TEMPO. (CORPOS-DE-PROVA IMERSOS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA).....  | 62 |
| FIGURA 45. | GRÁFICO DE EXPANSÃO X TEMPO, MÉDIA DAS 3 BARRAS DE ARGAMASSA REALIZADAS COM AREIA REATIVA E CIMENTO PORTLAND (CP V ARI RS). ....  | 63 |
| FIGURA 46. | GRÁFICO DE EXPANSIBILIDADE X TEMPO (CORPOS-DE-PROVA IMERSOS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA). ....  | 64 |
| FIGURA 47. | COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIO REALIZADOS COM AS BARRAS (ASTM C-1260) E O ENSAIO REALIZADOS COM OS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS EM SOLUÇÃO DE NaOH. ....   | 65 |
| FIGURA 48. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 01 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 67 |
| FIGURA 49. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 01 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 67 |
| FIGURA 50. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 01 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH A 80°C. ....                                     | 68 |
| FIGURA 51. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 02 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 68 |
| FIGURA 52. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 02 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 69 |
| FIGURA 53. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 03 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 69 |
| FIGURA 54. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 03 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 70 |
| FIGURA 55. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 03 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA AMBOS A 80°C.....           | 70 |
| FIGURA 56. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 04 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 71 |
| FIGURA 57. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 04 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 71 |
| FIGURA 58. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 04 DA GALERIA DE INSPEÇÃO. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 72 |
| FIGURA 59. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 01 DA GALERIA DE DRENAGEM. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 72 |
| FIGURA 60. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 02 DA GALERIA DE DRENAGEM. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 73 |
| FIGURA 61. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 03 DA GALERIA DE DRENAGEM. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 73 |
| FIGURA 62. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 04 DA GALERIA DE DRENAGEM. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C..... | 74 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| FIGURA 63. | GRÁFICO DE EXPANSÃO (%) X TEMPO (DIAS) DOS CORPOS-DE-PROVA EXTRAÍDOS DO FURO 05 DA GALERIA DE DRENAGEM. COMPARAÇÃO DAS EXPANSÕES OCORRIDAS EM SOLUÇÃO DE NaOH, ÁGUA E ESTUFA, TODOS A 80°C.....   | 74 |
| FIGURA 64. | TENSÕES MÁXIMAS OBTIDAS. ....   | 76 |
| FIGURA 65. | PLANILHA LAME PARA O CÁLCULO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO SECANTE. ....  | 77 |
| FIGURA 66. | MICROSCÓPIO ÓPTICO DE LUZ TRANSMITIDA, AUMENTO DE 100X. A) POROS PREENCHIDOS COM GEL, EM COR AZULADA DEVIDO À RESINA UTILIZADA PARA PREPARAÇÃO DA LÂMINA. B) GEL ENCONTRADO NA INTERFACE AGREGADO/ARGAMASSA E NAS MICROFISSURAS DO AGREGADO. .... | 78 |
| FIGURA 67. | A) BORDA DE RAA JUNTO AO AGREGADO (QUARTZO -Q), AUMENTO 200X. B) BORDA DE RAA JUNTO AO AGREGADO (PLAGIOCLÁSIO - P), AUMENTO 200X.....   | 79 |
| FIGURA 68. | MICROSCÓPIO ÓPTICO DE LUZ TRANSMITIDA, AUMENTO DE 40X. A) POROS PREENCHIDOS COM GEL, EM COR AZULADA DEVIDO À RESINA UTILIZADA PARA PREPARAÇÃO DA LÂMINA. B) QUARTZO (Q) APRESENTANDO FORTE EXTINÇÃO ONDULANTE. ....                               | 79 |
| FIGURA 69. | A) ANEL DE RAA AO REDOR DO AGREGADO. B) POROS PREENCHIDOS COM GEL. ....   | 80 |
| FIGURA 70. | A) AGREGADO (CALCITA) COM PRODUTO DA REAÇÃO NA BORDA E NAS FISSURAS, AUMENTO DE 40X. B) DETALHE DA BORDA COM RAA, AUMENTO DE 200X.....  | 80 |
| FIGURA 71. | QUARTZO (Q) APRESENTANDO FORTE EXTINÇÃO ONDULANTE.....  | 80 |
| FIGURA 72. | AGREGADO FISSURADO PREENCHIDO COM PRODUTO DA REAÇÃO. ....   | 81 |
| FIGURA 73. | A) VIDRO PYREX COM BORDA DE RAA. B) PORO PREENCHIDO COM PRODUTO DA REAÇÃO, AUMENTO DE 40X. ....   | 81 |
| FIGURA 74. | VIDRO PYREX (V.P.) COM BORDAS DE RAA, AUMENTO DE 40X.....   | 81 |
| FIGURA 75. | A) PORO PREENCHIDO COM PRODUTO DA REAÇÃO, AUMENTO DE 100X. B) DETALHE DO PORO COM ANEL NEGRO AO REDOR, AUMENTO DE 200X.....   | 82 |
| FIGURA 76. | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA COM PORO PREENCHIDO COM PRODUTO DE REAÇÃO. B) VISTA APROXIMADA DO PORO COM PRODUTOS DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO. ....   | 82 |
| FIGURA 77. | A) VISTA AMPLIADA DO PORO (1000X) MOSTRANDO PRODUTOS DA REAÇÃO E FISSURA. B) APROXIMAÇÃO DA IMAGEM ANTERIOR COM AMPLIAÇÃO DE 2000X MOSTRANDO “ROSÁCEAS” QUE PREENCHEM TOTALMENTE O PORO DO CONCRETO.....  | 83 |
| FIGURA 78. | A) DETALHE DAS ROSÁCEAS E DENTRO DO PORO. B) EDS DO PRODUTO (ROSÁCEAS) QUE APRESENTA UMA COMPOSIÇÃO SÍLICO-CÁLCICO-ALCALINA. ....   | 83 |
| FIGURA 79. | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA (AUMENTO DE 55X). B) DETALHE DO PORO PREENCHIDO GEL... 84   | 84 |
| FIGURA 80. | A) PORO PREENCHIDO COM GEL. B) DETALHE DA MORFOLOGIA DO GEL GRETADO E BOTRIODAL (AUMENTO 2000X) .....   | 84 |
| FIGURA 81. | A) DETALHE DA MORFOLOGIA DO GEL GRETADO E BOTRIODAL (AUMENTO 4000X) B) EDS DESTES PRODUTOS CRISTALIZADOS NO PORO APRESENTANDO UMA COMPOSIÇÃO SÍLICO-CÁLCICO-POTÁSSICA, COM UMA RELAÇÃO K/Ca > 1, CONFIRMANDO A PRESENÇA DE GEL. ....              | 85 |
| FIGURA 82. | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA (AUMENTO DE 55X) MOSTRANDO VÁRIOS POROS. B) DETALHE DO PORO PREENCHIDO COM GEL. ....  | 85 |
| FIGURA 83. | A) PORO COM ACÍCULAS DE PRODUTO CRISTALIZADO A PARTIR DO GEL. B) PRODUTOS CRISTALIZADOS DA RAA, FORMANDO ROSÁCEAS.....  | 86 |
| FIGURA 84. | A) GEL COM ESTRUTURA MACIÇA (AUMENTO DE 4000X). B) EDS DO PRODUTO (ROSÁCEAS) APRESENTANDO UMA COMPOSIÇÃO SÍLICO-CÁLCICO-ALCALINA. ....  | 86 |
| FIGURA 85. | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA COM PORO PREENCHIDO COM PRODUTO DE REAÇÃO. B) APROXIMAÇÃO DA IMAGEM ANTERIOR, MOSTRANDO FISSURAS SAINDO DO PORO. ....   | 87 |
| FIGURA 86. | A) APROXIMAÇÃO DA IMAGEM ANTERIOR COM AMPLIAÇÃO DE 2000X MOSTRANDO “ROSÁCEAS” QUE PREENCHEM TOTALMENTE O PORO DO CONCRETO. B) DETALHE DAS ROSÁCEAS E FISSURA DENTRO DO PORO. ....   | 87 |
| FIGURA 87. | A) AGREGADO APRESENTANDO FISSURA. B) GEL MACIÇO GRETADO NO PORO. ....   | 87 |
| FIGURA 88. | EDS DO PRODUTO DAS FIGURA 87 APRESENTANDO UMA COMPOSIÇÃO SÍLICO-CÁLCICO-ALCALINA, CONFIRMANDO A PRESENÇA DE GEL. ....   | 88 |
| FIGURA 89. | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA (AUMENTO DE 55X). B) DETALHE DO PORO PREENCHIDO COM PRODUTO DA REAÇÃO E FISSURAS SAINDO DO PORO. ....   | 88 |
| FIGURA 90. | A) ROSÁCEAS NO PORO DA FIGURA 89-B. B) DETALHE DA MORFOLOGIA DOS PRODUTOS CRISTALIZADOS DENTRO DO PORO.....   | 89 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| FIGURA 91.  | A) PORO COMPLETAMENTE REVESTIDO COM GEL GRETADO B) EDS DO PRODUTO DO PORO APRESENTANDO UMA COMPOSIÇÃO SÍLICO-CÁLCICO-ALCALINA, COM UMA RELAÇÃO Na/Ca > 1, CONFIRMANDO A PRESENÇA DE GEL. ....     | 89 |
| FIGURA 92.  | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA, APRESENTANDO VÁRIOS POROS. B) DETALHE DO PORO PREENCHIDO COM PRODUTO DA REAÇÃO. ....   | 90 |
| FIGURA 93.  | A) APROXIMAÇÃO DA IMAGEM ANTERIOR COM AMPLIAÇÃO DE 2000X MOSTRANDO “ROSÁCEAS” QUE PREENCHEM TOTALMENTE O PORO DO CONCRETO. B) DETALHE DAS ROSÁCEAS. ....  | 90 |
| FIGURA 94.  | A) DETALHE DAS ROSÁCEAS (20.000X). B) EDS DO PRODUTO DAS ROSÁCEAS. ....   | 90 |
| FIGURA 95.  | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA, APRESENTANDO PRODUTO DA REAÇÃO SOBRE O AGREGADO E DISPERSO NA PASTA. B) PRESENÇA DE GEL NA INTERFACE AGREGADO/PASTA ....   | 91 |
| FIGURA 96.  | A) GEL MACIÇO E GRETADO SOBRE O AGREGADO. B) AMPLIAÇÃO DE 1000X DO GEL. ....  | 91 |
| FIGURA 97.  | EDS DO GEL MACIÇO APRESENTANDO UMA COMPOSIÇÃO SÍLICO-CÁLCICO-POTÁSSICA, COM UMA RELAÇÃO K/Ca > 1. ....  | 91 |
| FIGURA 98.  | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA (AUMENTO DE 55X). B) DETALHE DO PORO PREENCHIDO COM PRODUTO DA REAÇÃO E FISSURAS SAINDO DO PORO. ....   | 92 |
| FIGURA 99.  | A) APROXIMAÇÃO DA IMAGEM ANTERIOR COM AMPLIAÇÃO DE 2000X MOSTRANDO “ROSÁCEAS” PREENCHENDO TOTALMENTE O PORO DO CONCRETO. B) DETALHE DAS ROSÁCEAS (4000X). ....                                    | 92 |
| FIGURA 100. | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA (AUMENTO DE 55X). B) DETALHE DO PORO PREENCHIDO COM PRODUTO DA REAÇÃO E GEL GRETADO AO REDOR DO PORO. ....  | 93 |
| FIGURA 101. | A) VISTA AMPLIADA DO PORO (1000X), MOSTRANDO PRODUTOS DA REAÇÃO. B) APROXIMAÇÃO DA IMAGEM ANTERIOR COM AMPLIAÇÃO DE 2000X, MOSTRANDO “ROSÁCEAS” QUE PREENCHEM TOTALMENTE O PORO DO CONCRETO. .... | 93 |
| FIGURA 102. | A) DETALHE DAS ROSÁCEAS (4.000X). B) EDS DO PRODUTO DAS ROSÁCEAS. ....  | 93 |
| FIGURA 103. | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA, INTEIRAMENTE RECOBERTA PELO PRODUTO DA REAÇÃO. B) DETALHE DO GEL FORMADO (500X). ....  | 94 |
| FIGURA 104. | A) DETALHE DO GEL FORMADO (1000X). B) DETALHE DO GEL FORMADO (2000X). ....  | 94 |
| FIGURA 105. | A) DETALHE DO GEL FORMADO (4000X). B) EDS DO GEL FORMADO, APRESENTANDO UMA COMPOSIÇÃO SÍLICO-ALUMINATO-SÓDICA. ....   | 95 |
| FIGURA 106. | A) VISÃO GERAL DA AMOSTRA APRESENTANDO POROS DE GRANDES DIMENSÕES. B) DETALHE DO GEL FORMADO (500X). ....   | 95 |
| FIGURA 107. | A) DETALHE DO GEL FORMADO (1000X). B) DETALHE DO GEL FORMADO (2000X). ....  | 95 |
| FIGURA 108. | A) DETALHE DO GEL FORMADO (1000X). B) EDS DO GEL FORMADO, APRESENTANDO UMA COMPOSIÇÃO SÍLICO-ALUMINATO-CÁLCICO-SÓDICA. ....   | 96 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1 - OCORRÊNCIA DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM BARRAGENS NO BRASIL. ....  | 6  |
| TABELA 2 - OCORRÊNCIA DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO NO MUNDO. ....  | 8  |
| TABELA 3 - FATORES DE MULTIPLICAÇÃO PARA O ÍNDICE DE DETERIORAÇÃO (GRATTAN-BELLEW & AIR<br>DANAY, 1992) (APUD HASPARYK, 1999). .... | 27 |
| TABELA 4 - COMPONENTES REATIVOS DOS AGREGADOS .....   | 33 |
| TABELA 5 - EFEITOS DE SAIS NA REDUÇÃO DE EXPANSÕES EM AMOSTRAS (MCCOY E CALDWELL, 1951) .....                                       | 36 |
| TABELA 6 – COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS POR RAMACHANDRAN (1998). ....  | 37 |
| TABELA 7 - TENSÕES DE RUPTURA OBTIDAS. ....   | 75 |



## RESUMO

A reação álcali-agregado é uma das principais causas de deterioração do concreto e de enorme dificuldade de recuperação em estruturas hidráulicas, principalmente em barragens. Esta pesquisa teve por objetivo verificar a existência do fenômeno RAA no concreto da barragem da UHE de Mascarenhas, através de análises laboratoriais com corpos-de-prova extraídos da estrutura. Os métodos empregados foram: análise macroscópica, análise microscópica em microscópio óptico de luz transmitida, microscópio eletrônico de varredura com o auxílio de espectrômetro de energia dispersa (EDS) e ensaio de reatividade acelerado. Também foram analisadas as características mecânicas do concreto através dos ensaios de compressão e módulo de elasticidade. O trabalho apresenta uma análise comparativa entre os ensaios de reatividade potencial acelerado, realizados com barras de argamassa (ASTM C-1260/01) e o método de reatividade potencial, realizado com corpos-de-prova cilíndricos imersos em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1N, água deionizada e estufa, todos a 80°C. A análise petrográfica mostrou a presença de gel expansivo na zona de interface agregado/argamassa, nos poros do concreto e nas microfissuras do agregado. Através do microscópio eletrônico de varredura em conjunto com a espectrometria de energia dispersa (EDS), identificou-se produtos com morfologias e composições químicas típicas da RAA, sendo estes considerados uma ferramenta de fundamental importância para avaliação de produtos expansivos causados pela RAA. Os valores médios obtidos nos ensaios de compressão simples e módulos de elasticidade foram, respectivamente, de 26,2 MPa e 25 GPa. A comparação entre os métodos de reatividade permitiu utilizar a metodologia de ensaios da ASTM C – 1260/01, para submeter os corpos-de-prova extraídos da barragem e verificar a capacidade de expansão quando submetidos a condições péssimas de tratamento, que apresentaram variações de comprimento de até 0,2%.

Palavras-chave: reação álcali-agregado, concreto, durabilidade.

## **ABSTRACT**

The alkali-aggregate reaction (AAR) is one of the main causes of concrete deterioration and it creates enormous difficulty in recovery of hydraulic structures, especially in dams. The objective of this research is to verify the existence of AAR in concrete from the Mascarenhas' Hydroelectric Plant dam. The methods used were: macroscopic analysis, microscopic analyses using the optical microscope, scanning electron microscope and the accelerated reactivity test. The mechanical characteristics of the concrete were also analyzed through compression and elasticity module tests. This work also presents a comparative analysis between the accelerated potential tests, done with mortar bars (ASTM C-1260/01) and the potential reactivity method, done with cylindrical sample immersed in Sodium Hydroxide solution (NaOH) at 1N, de-ionized water and placed in an oven, at 80°C. The petrographic analyses showed expansive gel in the aggregate/mortar interface zone, in the concrete pores and in the aggregated microfissures. Using the scanning electron microscope combined with dispersive energy spectrometry, products with morphologies and AAR typical chemical compositions were identified, and were considered as essential tool for the evaluation of expansive products caused by AAR. The average values obtained in the simple compression tests and elasticity modules tests were obtained in the following order: 26,2 Mpa and 25 Gpa. Test comparisons permitted the use of test methodology from ASTM C-1260/01 for the submission of the tests extracted from the dam, verified the expansion capacity when under extreme treatment conditions. The samples extracted from the structure, which were submitted to the reactivity tests, presented length variations of up to 0,2%.

Key-words: alkali aggregate reaction, concrete, durability.

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é considerado um dos materiais mais utilizados no mundo, tanto pela facilidade da preparação e manuseio como pelo baixo custo comparado a outros materiais de construção. No entanto, vários são os processos de deterioração deste material, provenientes de causas físicas e químicas. Dentre esses, destacam-se a corrosão das armaduras, a ação gelo-degelo, o ataque por sulfatos e a reação álcali-agregado (RAA).

Inúmeras pesquisas estão sendo desenvolvidas, visando as questões de durabilidade e segurança em estruturas de concreto, principalmente, em construção de grande porte, como as barragens.

Os estudos a respeito da reação álcali-agregado iniciaram-se na década de 40 na Califórnia, realizados por STANTON em estruturas de concreto, segundo relatos de KIHARA (1986). De acordo com VEIGA et al, (1997), diversos países apresentam patologias em estruturas com esse tipo de reação. A RAA ocorre devido ao processo químico que provém da reação de alguns dos compostos mineralógicos do agregado com hidróxidos alcalinos originários do cimento, água de amassamento e agentes externos, os quais estão dissolvidos na solução dos poros de concreto. O produto resultante dessa reação é um gel expansivo na presença de umidade, podendo originar fissuras, aumento de permeabilidade, diminuição da resistência física e química e conseqüente ruptura da estrutura.

Segundo SILVEIRA (1996), as principais evidências que apontam para a existência de RAA em estruturas de concreto são:

- Fissuras orientadas em forma de mapa;
- Eflorescência e exsudação de gel;
- Descoloração do concreto;

- Agregados graúdos com bordas de reação;
- Poros do concreto preenchidos total ou parcialmente, esbranquiçado com composição do gel e;
- Microfissuração da argamassa com preenchimento de gel.

A partir da década de 60, o Brasil teve um grande avanço na construção de hidroelétricas, desenvolvendo, juntamente, técnicas de construção com prazos de execução acelerados e tecnologias para a utilização de concreto. Com o crescimento dessas construções, paralelamente, surgiram problemas que chamaram a atenção dos técnicos envolvidos, destacando-se o fenômeno da reação álcali-agregado (RAA).

A RAA é uma das manifestações patológicas de maior grau de deterioração do concreto e de enorme dificuldade de recuperação, principalmente em barragens, fatores que levaram a RAA a ser um objeto de pesquisa mais aprofundado visando, entre os outros tópicos, a questões de segurança e durabilidade.

## **1.1 Objetivos da Pesquisa**

O objetivo principal desta pesquisa é verificar a existência de reação álcali-agregado em uma barragem de concreto, por meio de análises laboratoriais com corpos-de-prova extraídos do local da observação e relato dos seguintes ensaios: ensaio de reatividade potencial, análise petrográfica e microscopia eletrônica de varredura, bem como o levantamento de algumas das propriedades mecânicas do concreto descritos em ensaios de compressão simples e módulo de deformação.

Como objetivo secundário, foi realizada uma análise comparativa entre os ensaios de reatividade potencial acelerado, executado com barras de argamassa (ASTM C-1260/01) e o método de reatividade potencial, realizado com corpos-de-prova cilíndricos imersos em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1N, água deionizada e estufa, todos a 80°C. Essa comparação tem como objetivo validar os três ensaios de reatividade realizados com os corpos-de-prova extraídos da barragem e submetidos à péssima condição de tratamento.

## **1.2 A Usina Hidrelétrica de Mascarenhas**

A barragem, foco de estudo desta pesquisa, faz parte da Usina Hidrelétrica de Mascarenhas, que está situada no Rio Doce, a aproximadamente 150 quilômetros do porto de Vitória, Distrito de Mascarenhas, estado do Espírito Santo.

A Usina Hidrelétrica de Mascarenhas é uma construção composta de barragem de concreto tipo gravidade, com um vertedouro controlado por comportas, uma casa de força em concreto com três unidades turbo-geradoras de 40 MW instaladas, e previsão para a instalação de uma quarta.

As principais estruturas de concreto da usina são: ombreira esquerda, ombreira direita, vertedouro, barragem central, casa de força, subestações de 13.2 e 138 KV e estação de tratamento d'água.

A ombreira esquerda consiste em uma barragem de seis pilares não rebaixados, de concreto, com um comprimento total de 94 m. O bloco 1 liga-se ao solo natural de onde se eleva, na cota 63,50 ao topo da barragem, em que se encontra o pátio para manobras, bem como o acesso à galeria de inspeção.

O vertedouro é formado por sete vãos de soleiras de concreto rebaixado, cada um tendo sua crista na cota 44. O fluxo é contido ou controlado por sete comportas radiais, medindo cada uma 13,8m de largura por 16,3m de altura. A direção da descarga do vertedouro é controlada por paredes guias de concreto. O comprimento total do vertedouro é de 144,2 m, dividido em 7 blocos de construção.

A barragem central tem por base seis blocos de concreto não rebaixados, com um comprimento total de 105,18 m.

A casa de força compõe-se de quatro unidades turbo-geradoras e um pátio de montagem. Cada área de unidade turbo-geradora está dividida em três segmentos estruturais: tomada d'água, pátio do gerador e tubo de sucção. O comprimento total da casa de força é de 115,2 m.

A ombreira direita tem seis blocos não rebaixados de barragem de concreto, com o comprimento total de 83,73 m.

A água potável é coletada, de um reservatório a aproximadamente 500m da barragem, através de bombas flutuantes e tratada por meio de floculação, sedimentação, filtração e cloração.

Há três diques de contenção de água: o primeiro, na baixa parede direita do reservatório; o segundo, que funciona apenas em condições anormais de alta, próximo à estação de tratamento e o terceiro, que isola uma ravina natural na margem direita, que mais tarde foi incorporado ao aterro da gradação.

Todas as três turbinas são de eixo vertical, pás reguláveis tipo Kaplan, com caixa espiral de concreto. Cada uma tem a capacidade de 55.700 CV a uma queda líquida de 17,6 m e uma velocidade de operação de 105,8 rpm. Os geradores são de eixo vertical, movidos a turbina hidráulica, tipo “umbrella”. Cada gerador tem potência nominal de 38.500 KVa, fator de potência 0,99, tensão nominal de 13.800 V, 60 ciclos.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

A dissertação foi desenvolvida em cinco capítulos. O primeiro apresenta a introdução ao assunto, os objetivos da pesquisa e um resumo sobre a Usina Hidrelétrica de Mascarenhas.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre o tema, reação álcali-agregado, contendo: a ocorrência do fenômeno RAA no panorama nacional e internacional, os mecanismos de expansão da RAA, os tipos de reação, os métodos de investigação, os fatores que interferem na reação e os efeitos de adições na redução da expansão.

O terceiro apresenta o programa experimental utilizado na pesquisa e a metodologia desenvolvida: inspeção da barragem, extração dos corpos-de-prova e ensaios de laboratório.

Nesse capítulo também é apresentada uma análise comparativa entre os ensaios de reatividade empregados no estudo.

Os ensaios, análise e discussão dos resultados obtidos são apresentados no quarto capítulo.

No capítulo cinco são relatadas as conclusões deduzidas da pesquisa, bem como sugestões para futuros trabalhos sobre o tema.

## 2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

### 2.1 OCORRÊNCIA DO FENÔMENO RAA EM OBRAS DE BARRAGENS

#### 2.1.1 Panorama Nacional

De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens e trabalhos apresentados no Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto (1997), são apresentados, na Tabela 1, os registros referentes a RAA em estruturas hidráulicas.

**Tabela 1 - Ocorrência de reação álcali-agregado em barragens no Brasil.**

| Companhia   | Uhe/Barragem     | Situação/Ocorrência  | Construção/<br>Evidência<br>da Raa | Tipo de Reparo ou<br>Recuperação  |
|---|------------------|--|------------------------------------|---|
| CHESF –<br>Companhia<br>Hidroelétrica do<br>São Francisco | Paulo Afonso I   | Juntas abertas   | 1955 / 1978                        | -   |
|   | Paulo Afonso II  | Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos e inclinação das pás.  | 1962 / 1978                        | -   |
|   | Paulo Afonso III | Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos e inclinação das pás.  | 1973 / 1978                        | -   |
|   | Paulo Afonso IV  | Fissuração, inclinação dos eixos das turbinas, ovalização do poço da turbina, redução de folgas no desnivelamento da tampa da turbina. | 1979 / 1985                        | Em estudo.  |
|   | Moxotó           | Fissuração, ovalização da casa de força e vertedouro de fundo e roçamento de pás e turbina.  | 1974 / 1978                        | Corte de juntas.  |
| CEMIG – Cia.<br>Energética de<br>Minas Gerais             | Jaguara          | Alteamento da crista   | 1971 / 1988                        | -   |
|   | Peti             | Fissuração e alteamento da crista.   | 1945 / 1964                        | Injeção de cimento, substituição do concreto superficial danificado, tratamento das fissuras, impermeabilização da face montante, em 1975; nova impermeabilização da face montante em 1984; permanência de vazamentos (1997). |



| Companhia   | Uhe/Barragem                  | Situação/Ocorrência  | Construção/<br>Evidência<br>da Raa | Tipo de Reparo ou<br>Recuperação  |
|---|-------------------------------|--|------------------------------------|---|
| FURNAS –<br>Centrais Elétricas  | Furnas                        | Fissuração nos topos dos pilares do vertedouro, blocos de ancoragem dos condutos forçados, superfície do salto de esqui, casa de força, desnivelamento do coroamento entre muro central e blocos adjacentes. | 1963 / 1976                        | Monitoramento.  |
|   | Mascarenhas de Moraes         | Fissuração na crista, exsudação de gel e diminuição de folgas de máquinas.   | 1957 / 1996                        | Recentragem de máquinas e ajustes do mancal.  |
|   | Estreito (em avaliação)       | Exsudação de gel   | - /1996                            |   |
|   | Porto Colômbia (em avaliação) | Exsudação de gel e ovalização do poço da turbina   | 1973 / 1985                        | Esmerilhamento de anéis.  |
| ELETROPAULO   | Traição                       | Fissuração, infiltrações, desalinhamento do eixo das bombas, ovalização de poço, aquecimento e desgaste de mancais-guia e travamento da comporta.  | 1940 / 1980                        | -   |
|   | Billing-Pedras                | Fissuração e expansão dos pilares do vertedouro.   | 1936 / 1992                        | Em estudo.  |
| SABESP – Cia.<br>de Saneamento<br>Básico do Estado<br>de São Paulo S.A. | Pedro Beicht                  | Fissuração, infiltração, lixiviação  | 1933 / 1991                        | -   |
|   | Sistema Cantareira            | Ocorrência de RAA na tomada d'água do túnel 6.   | 1974 / 1989                        | Ajuste e recuperação das guias das grades, modificações nas comportas ensecadeiras.   |
| LIGHT – Serviços<br>de Eletricidade<br>S.A.                             | Ilha dos Pombos               | Fissuração nos pilares do vertedouro e paredão do canal adutor.  | 1924 / 1991                        | Injeção de cimento, recomposição do concreto segregado, impermeabilização de superfícies em contato com água através de concreto projetado. |
| CBA - Cia.<br>Brasileira de<br>Alumínio                                 | Jurupará                      | Fissuração e vazamentos.   | 1937 / -                           | Atirantamento, injeção de fissuras, impermeabilização com concreto a montante.  |
| ACESITA S.A.  | Sá Carvalho                   | -  | -                                  | -   |
| EMBASA –<br>Empresa Baiana<br>de Água e<br>Saneamento                   | Joanes II                     | Fissuração   | 1971 / 1988                        | -   |

Fonte: Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto (1997).

Nota-se que são diversos casos encontrados com manifestações patológicas em UHE registradas até o momento.

### 2.1.2 Panorama Internacional

De acordo com KIHARA (et al, 1998), as ocorrências de RAA em estruturas hidráulicas, em todo o mundo, chegavam a 142 casos, até 1998, conforme Tabela 2.

**Tabela 2 - Ocorrência de reação álcali-agregado no mundo.**

| PAÍS          | CASOS | PAÍS            | CASOS |
|---------------|-------|-----------------|-------|
| Canadá        | 41    | Argentina       | 1     |
| EUA           | 29    | Áustria         | 1     |
| Brasil        | 20    | Costa do Marfim | 1     |
| África do Sul | 10    | Ghana           | 1     |
| Noruega       | 7     | Inglaterra      | 1     |
| França        | 5     | Moçambique      | 1     |
| País de Gales | 5     | Nigéria         | 1     |
| Portugal      | 4     | Quênia          | 1     |
| Espanha       | 3     | Romênia         | 1     |
| Austrália     | 2     | Suíça           | 1     |
| Índia         | 2     | Uganda          | 1     |
| Paquistão     | 2     | Zâmbia          | 1     |

Fonte: KIHARA, SBRIGHI NETO & KUPERMAN, 1998

O Brasil é o terceiro país com maior número de casos registrados com ocorrência de RAA em UHE, ficando atrás apenas do Canadá e EUA.

## 2.2 MECANISMOS DE EXPANSÃO DA RAA.

Os estudos que contribuíram para explicar as teorias dos mecanismos de expansão da reação álcali-agregado, surgiram no início do século passado, em 1916, quando o geólogo STEPHENSON analisou a formação de um precipitado gelatinoso expansivo que se formava a partir da reação entre o feldspato e o carbonato de sódio (PAPPALARDO, 1998). Os agregados, considerados potencialmente reativos, foram observados em corpos-de-prova de concreto por PEARSON e LOUGHLIN, que relataram uma ação deletéria desconhecida (PAPPALARDO, 1998).

Em 1935, o geólogo HOLDEN, do Instituto Politécnico da Virgínia, formalizou a descoberta da expansão causada por reações entre agregados e cimento. Em 1940, surgiu o primeiro trabalho publicado por STATON, na Califórnia, afirmando que a causa da expansão e fissuração de algumas estruturas de concreto era devido à reação do agregado com hidróxidos alcalinos libertados pelo cimento durante sua hidratação (PAULON, 1981). A partir daí, várias pesquisas iniciaram no sentido de descrever e fundamentar teoricamente o fenômeno da RAA (PAPPALARDO, 1998).

A primeira teoria para explicar o mecanismo de expansão do gel, produto da reação, foi elaborada por HANSEN, em 1944. HANSEN formulou a teoria da pressão osmótica, onde hipoteticamente produtos da reação ficavam confinados dentro de uma membrana semipermeável da pasta de cimento, a qual, devido a pressões hidráulicas, causava expansão na estrutura (PAULON, 1981).

Em outra teoria, desenvolvida por VIVIAN, em 1950, a da absorção, relata que as expansões e fissurações ocorrem devido às pressões mecânicas que produtos no estado sólido ou semi-sólido exercem na estrutura (PAULON, 1981).

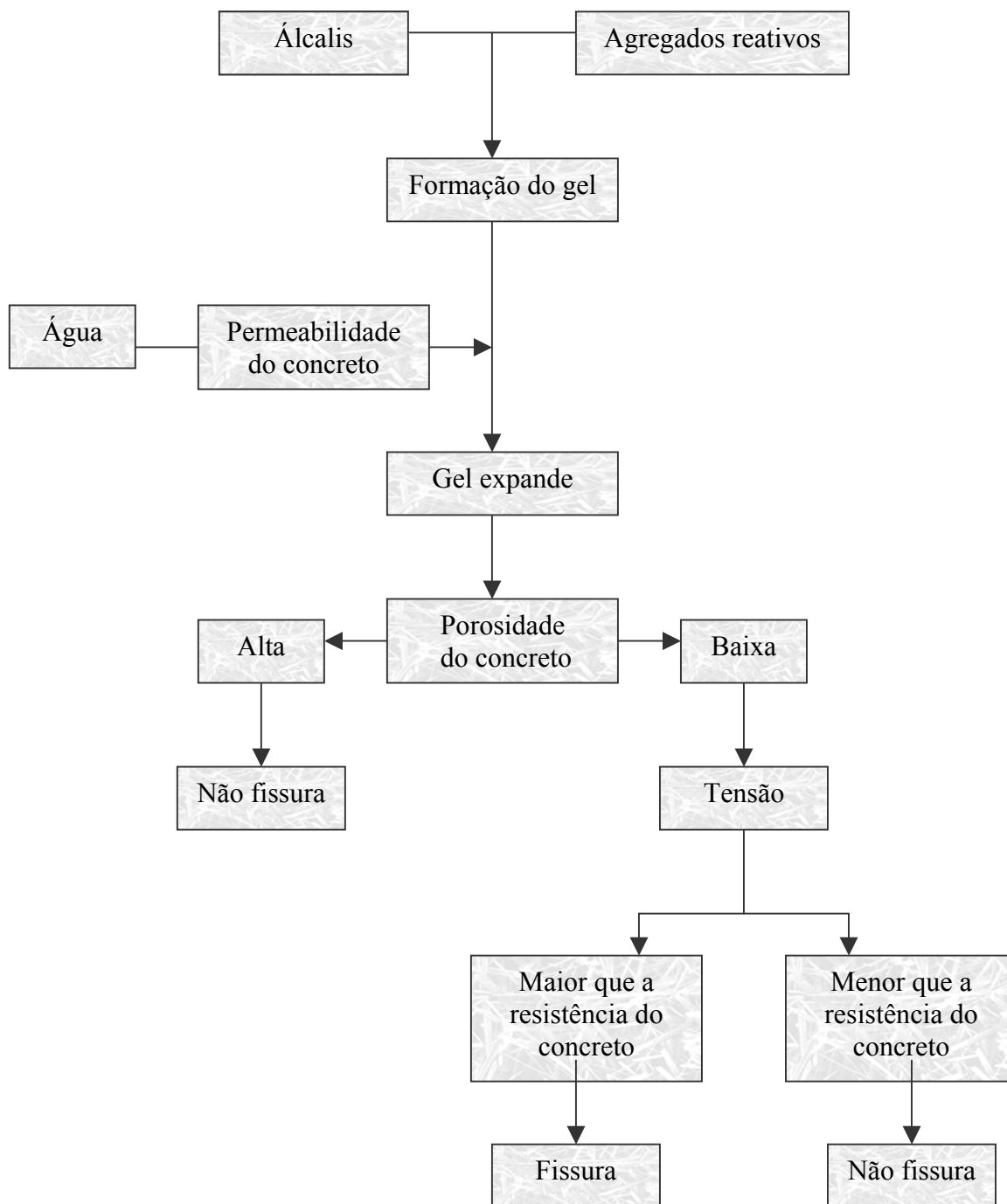
VIVIAN observou, em seus estudos, que a principal causa de ataque ao agregado reativo é a alta concentração de íons de hidróxido que estão dissolvidos nas soluções dos poros do concreto. Estes íons devem-se ao elevado teor de sódio e potássio, existentes no cimento, podendo também serem provenientes da reação nos agregados, água de amassamento e de pozolanas (PAULON, 1981).

Em conceitos baseados na química de superfície, nas características de expansão de barras de argamassa e na composição química do gel formado, PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, em 1997, idealizaram um modelo para elucidar as expansões causadas pela RAA. De acordo com os autores, a reação está relacionada com o fato de que a superfície da sílica, carregada com uma dupla camada de cátions (íons sódio, potássio e cálcio), neutraliza a carga negativa, presente na solução dos poros do concreto. Tal reação é responsável pela dissolução da sílica e a formação de um gel, que em presença de água, é expansivo (HASPARYK, 1999).

A pressão no concreto devido à reação álcali-sílica, calculada com base no modelo Gouy-Chapman na parte difusa da dupla camada elétrica, pode variar de 2,2 MPa a 10,3 MPa (PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, 1997; HASPARYK, 1999) valores coerentes com as medidas na prática que foram da ordem de 6 MPa a 7 MPa (DIAMOND, 1989).

Com relação ao poder de expansão do gel formado pela reação, considera-se que um gel com maior teor de íons sódio ou potássio ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) terá maior expansão que um gel rico em cálcio, pois a valência e a concentração dos íons determinarão a espessura da dupla camada elétrica e as forças de repulsão (íons monovalentes  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  produzem maior espessura na dupla camada) (PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, 1997; HASPARYK, 1999).

Para melhor visualização do processo de reação serão apresentadas, na Figura 1, as etapas desde a formação do gel até a fissuração.



**Figura 1. Processo de reação álcali-agregado. (FERRARIS 2000, apud VALDUGA 2002)**

## 2.3 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

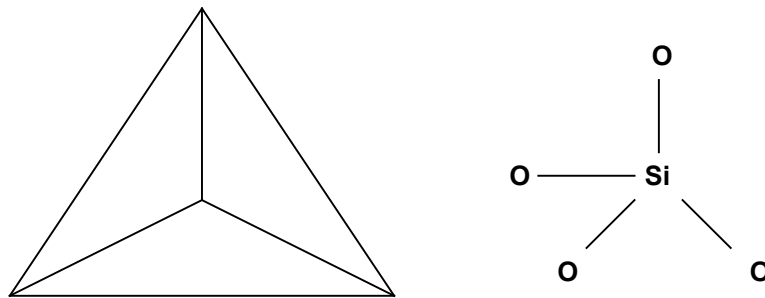
Existem três categorias de reação álcali-agregado que se diferem do mecanismo de reação, critérios práticos para a identificação da reatividade e medidas de prevenção (PAULON, 1981). São elas:

- Reação Álcali- Sílica;
- Reação Álcali- Silicato;
- Reação Álcali- Carbonato.

### 2.3.1 Reação Álcali- Sílica

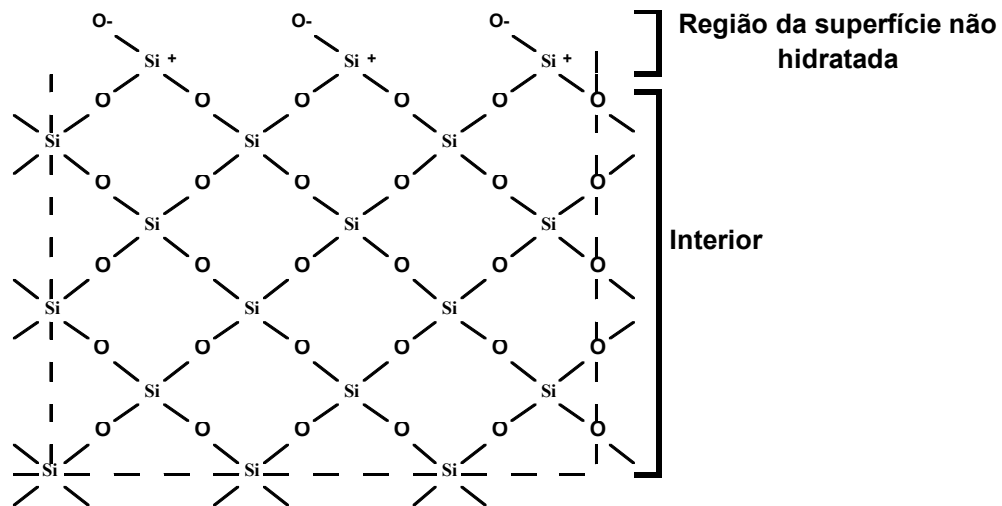
Reações do tipo álcali-sílica são reações expansivas mais conhecidas e registradas no mundo (KIHARA, 1993; HASPARYK,1999).

A sílica, em formato tetraédrico, tem como unidade básica estrutural o íon silício  $\text{Si}^{4+}$ , circundado por quatro íons de oxigênio  $\text{O}^{2-}$  (PAULON,1981), conforme Figura 2.



**Figura 2. Estrutura tetraédrica da sílica (HASPARYK, 1999).**

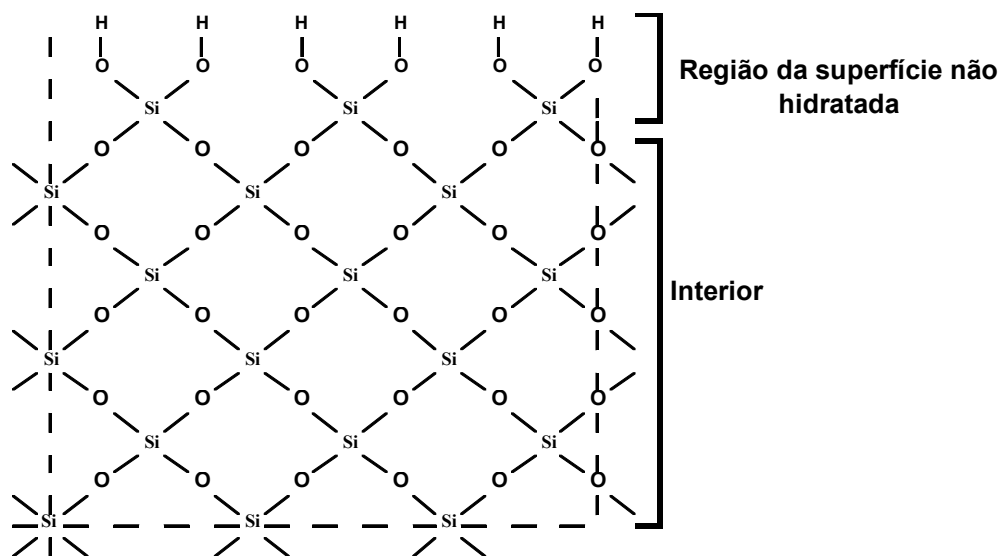
Esta estrutura pode ser representada no plano, conforme Figura 3 (PAULON, 1981).



**Figura 3. Estrutura da sílica no plano, mostra da superfície não hidratada (PAULON, 1981).**

No interior da estrutura, as valências de silício ( $\text{Si}^{4+}$ ) e oxigênio ( $\text{O}^{2-}$ ) estão equilibradas, ou seja, as cargas estão neutralizadas. Porém, na região da superfície, o íon oxigênio está ligado somente a um íon de silício, ficando com uma carga negativa desequilibrada.

Quando da hidratação desta partícula, o íon hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), proveniente da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), entra em contato com o íon positivo do silício, e o íon positivo hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) entra em contato com o íon negativo do oxigênio, complementando o tetraedro silício-oxigênio, conforme Figura 4 (PAULON, 1981).

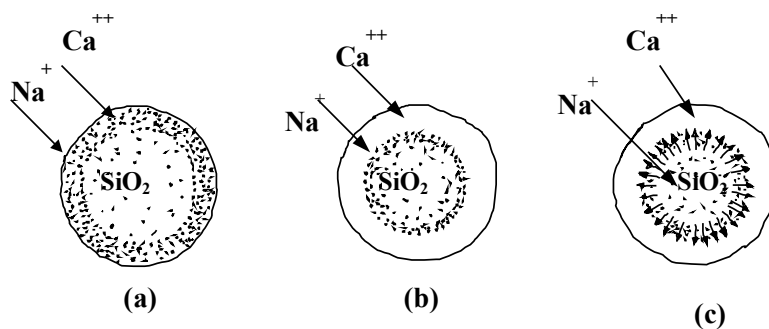


**Figura 4. Superfície hidratada da sílica (PAULON, 1981)**

Segundo PAULON (1981), a quantidade de moléculas de água que se mantém na ligação é proporcional à área de superfície e não à quantidade total de sílica. Outro fator importante é que os íons hidroxilas estão mais fortemente ligados do que os íons de hidrogênio, os quais podem ser liberados em meio aquoso, produzindo íons de hidrogênio livres, tornando as partículas da superfície de sílica ácidas. Portanto, a reatividade dependerá da superfície específica da sílica: quanto maior for a subdivisão da partícula macroscópica, maior será o número de moléculas de água de absorção, aumentando o número de íons de hidrogênio livres e ocasionando um aumento de reatividade.

Como exemplo de minerais com forma desordenada que dão um caráter reativo à sílica, pode-se citar: opala ou sílica amorfa, calcedônia (variedade de quartzo fibroso ou criptocristalino), cristobalita e tridimita (formas cristalizadas metaestáveis de sílica), vidros naturais ou vulcânicos (depósitos piroclásticos ou rochas vulcânicas) e os vidros artificiais (pyrex) (HOOBS,1998; KIHARA,1986; RODRIGUES, 1994; HASPARYK,1999).

De acordo com PLUM, PAULSEN e IDORN (apud PAULON, 1981), a Figura 5 mostra o mecanismo de reação álcali-sílica.



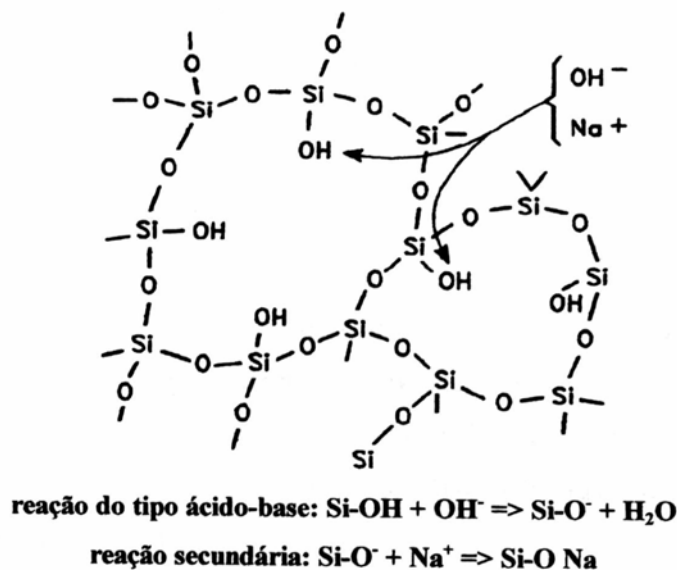
**Figura 5. Partícula de sílica reativa envolta com pasta de cimento (PAULON, 1981).**

Inicialmente, na Figura 5.a nota-se a partícula de sílica reativa circundada por íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  contidos na pasta de cimento em solução básica. Devido à alta concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na pasta, forma-se, segundo a Figura 5.b, uma fina camada de um gel de cal-álcali-sílica de caráter não expansivo ao redor da sílica. Essa fase é inócua.



Na fase seguinte, Figura 5.c, os íons de cálcio e sódio penetram na membrana semipermeável, onde reagirão com a sílica. Esta reação será inócua se a concentração de cálcio for alta o suficiente para assegurar a contínua formação do gel não-expansivo, uma vez que há o consumo de álcalis durante a reação, havendo uma redução na concentração alcalina. Porém, se a concentração de cálcio não for suficiente, os álcalis reagirão formando um gel de álcali-sílica, que em presença de água, se expandirá e ocasionará fissuras quando as forças de expansão do gel forem superiores à resistência à tração da pasta de cimento. Estas expansões cessarão somente quando os álcalis ou a sílica reativa forem consumidos.

Outro mecanismo que explica este tipo de reação, e é apresentado por diversos pesquisadores (GLASSER & KATAOKA, 1981; TURRIZIANI, 1986; HASPARYK, 1999), é a ocorrência de um ataque ao grupo silanol (SiOH) pelos íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) através de uma reação ácido-base. Posteriormente, há um equilíbrio entre os cátions  $\text{Na}^+$  e os ânions de oxigênio  $\text{O}^{2-}$ , formando assim o gel sílico alcalino, conforme Figura 6.



**Figura 6.** Ataque dos íons  $\text{OH}^-$  ao grupo silanol (TURRIZIANI, 1986; HAPARYK, 1999)

A segunda etapa da reação, demonstrada na Figura 7, se dá pelo ataque dos íons hidroxilas ao grupo siloxano, gerando os monômeros silicatos ( $\text{H}_2\text{SiO}_4$ ), que permite a

absorção de água e de íons alcalinos, resultando em expansão, fissuração, exsudação de gel e deterioração da estrutura, (BULLETIN 79, 1991; HASPARYK, 1999).

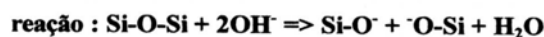
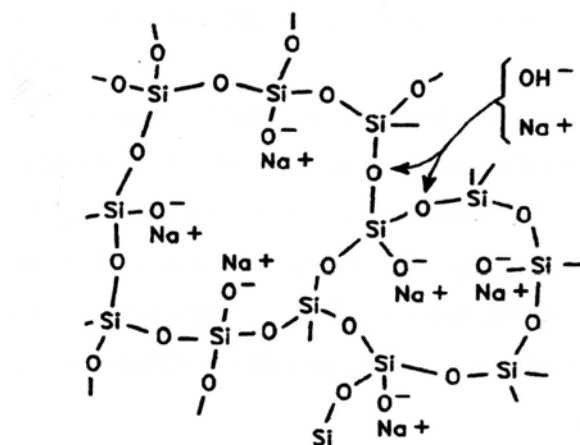


Figura 7. Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas (TURRIZIANI, 1986; HAPARYK, 1999)

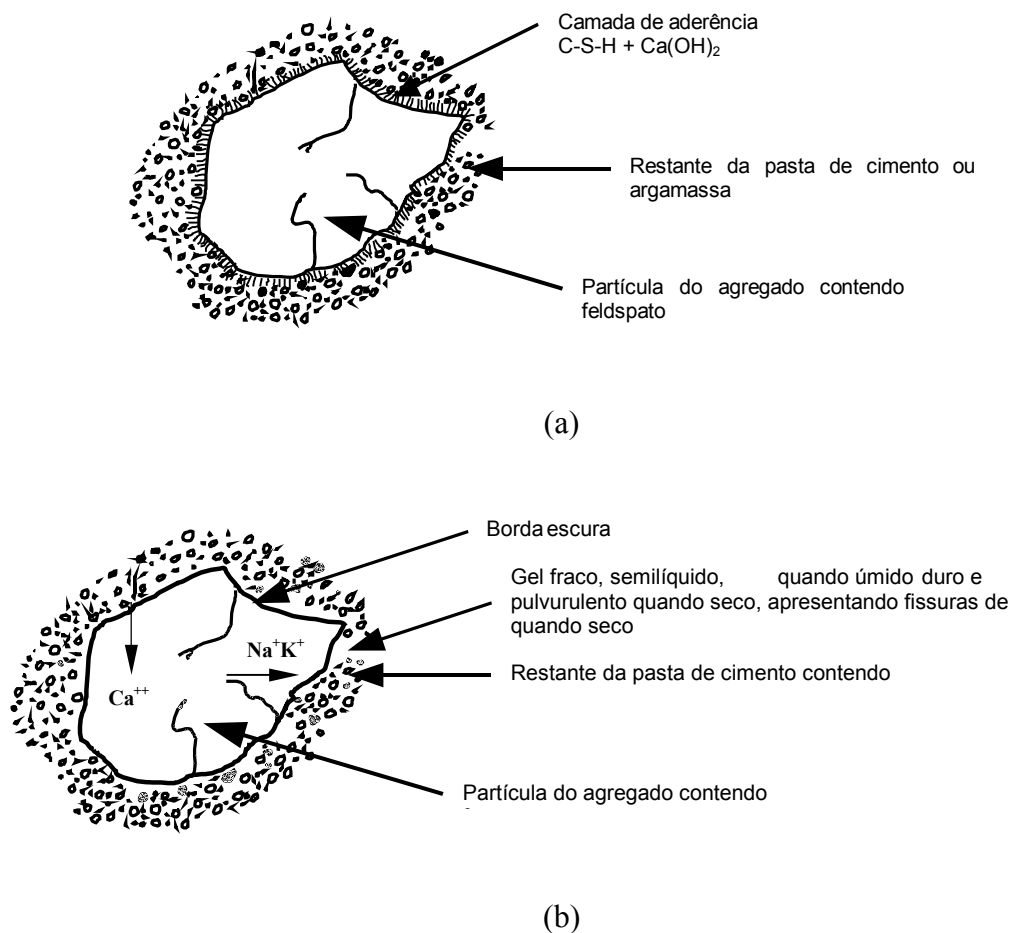
### 2.3.2 Reação Álcali-Silicato

Segundo KIHARA (1986), a reação álcali-silicato é de mesma natureza da reação álcali-sílica, porém mais lenta, e é responsável na maioria dos casos pela deterioração de estruturas de concreto no Brasil.

Ainda conforme o mesmo autor, a reação se dá entre os álcalis disponíveis do cimento com os silicatos presentes em rochas sedimentares, metamórficas e ígneas, sendo a presença do quartzo tensionado ou minerais expansivos do grupo dos filossilicatos como os principais elementos para ocasionar a reação.

VAN AARDT & VISSER (apud PAULON, 1981) propuseram uma teoria chamada “Solution Theory” para explicar a reação álcali-silicato, através da reatividade de agregados contendo feldspato. Ainda de acordo com os autores, nas fases iniciais do concreto origina-se uma camada de aderência ao redor do agregado composta por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mais hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou CH). No decorrer do tempo e na presença de umidade, o CH (proveniente da hidratação do cimento) reagirá com o feldspato.

Também poderá ocorrer reação devido à penetração de cal no agregado, liberando álcalis sob forma de KOH, NaOH e/ou silicatos de potássio e sódio na forma de gel parcialmente solúvel em água. Devido à concentração de álcalis, os silicatos de cálcio (responsáveis pela aderência) se dissolverão em silicatos de potássio e sódio, formando um vidro ou gel composto por Ca, Na, K e sílica ao redor e internamente, às vezes, ao agregado. O vidro ou gel é um péssimo elemento da ligação, uma vez que ele é parcialmente solúvel em água e pode se expandir ou se contrair devido ao ganho ou a perda de água. Neste caso existirá uma parte do agregado envolvido pelo vidro ou gel semilíquido de baixa resistência. A figura 8 mostra o agregado antes em a, e depois em b, da reação.



**Figura 8. Características do agregado antes (a) e depois da reação (b) (VAN AARDT & VISSER, 1977; HASPARYK, 1999).**

A partir desta teoria, VAN AARDT & VISER (1977) sugerem que rochas feldspáticas que liberem álcalis devem ser evitadas como agregado para concreto.

### 2.3.3 Reação Álcali-Carbonato

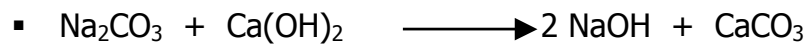
A reação álcali-carbonato ocorre de forma totalmente diferente das reações álcali-sílica e álcali-silicato. Este tipo de reação ocorre quando do emprego de certos tipos de calcários dolomíticos como agregado para o concreto (PAULON, 1981).

No Brasil não existem casos registrados de ocorrência da reação álcali-carbonato, mas em países como EUA, Iraque, Inglaterra e China encontram-se concretos afetados por esta reação (HASPARYK, 1999).

A expansão das rochas carbonáticas, calcários dolomíticos argilosos, ocorre pela reação do ataque dos álcalis do cimento ao calcário dolomítico, formando brucita, carbonato alcalino e carbonato cálcico. Esse tipo de reação é chamado de desdolomitização (PAULON, 1981).



Após a ocorrência da desdolomitização, o carbonato de sódio (carbonato alcalino) reage com os produtos da hidratação do cimento, dentro da pasta de cimento:



Nessa reação ocorre novamente a formação dos álcalis, possibilitando a continuidade da reação de desdolomitização. Este ciclo ocorrerá até o consumo total da dolomita ou até que a concentração de álcalis tenha sido reduzida por reações secundárias (PAULON 1981).

Segundo DENG et al (1994), em análises petrográficas de testemunhos de concreto, os danos causados ao concreto era devido à potencialidade reativa dos agregados de rochas dolomíticas. A provável causa da expansão, segundo os pesquisadores, é a reação de desdolomitização.

## **2.4 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DA RAA**

Segundo ANDRIOLO (1997), existem várias metodologias de ensaios para verificar a potencialidade dos agregados quanto à reação com os álcalis dos cimentos, as quais se concentram no conhecimento do fenômeno (RAA) e nas possibilidades de se minimizar os efeitos nocivos das reações.

Entre os principais itens citados pelo autor, sobre a conceituação que um ensaio rápido deve alcançar, destacam-se:

- Obtenção dos resultados em poucos dias, no máximo em semanas;
- A metodologia deve ser simples;
- Os aparelhos e equipamentos devem ser de baixo custo e de fácil manuseio;
- Os resultados devem evidenciar relacionamento e correspondência com a realidade;
- Os erros e disposições não podem ter magnitudes que superem o campo de valores a determinar;
- A possibilidade de obter correlações de baixa dispersão, ao ser usado por operadores e laboratórios diferentes.

Para a análise da ocorrência da reação álcali-agregado são indicadas diversas metodologias de longa e curta duração, conforme descrito a seguir.

### **2.4.1 Análise Petrográfica - ASTM C-295 (1990); ASTM C-856 (1995); ABNT NR-7389**

Utiliza-se para obter informações qualitativas sobre os minerais e a natureza do agregado quanto a sua nocividade em relação à RAA.

O agregado será investigado pela análise petrográfica para identificar minerais potencialmente reativos. As técnicas utilizadas são:

- Observações macroscópicas e microscópicas através de microscopia estereoscópica (luz refletida), microscopia óptica (luz transmitida) e microscopia eletrônica.
- Técnicas analíticas, tais como difração de raios-x e espectroscopia de infravermelho, usadas para caracterizar a textura e forma cristalina da sílica nas partículas dos agregados.

As amostras dos agregados ou concretos deverão ser confeccionadas em lâminas delgadas, com aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  de espessura, para serem observadas através do microscópio eletrônico polarizador de luz transmitida. Com relação aos agregados, a investigação determina a sua classificação petrográfica através da descrição mineralógica, identificando os minerais deletérios textural e estrutural. Com relação aos concretos, a investigação determina a existência da RAA, através da ocorrência de bordas de reação nos agregados, gel contido nos poros e microfissuras causadas pela expansão do gel.

Os resultados da análise petrográfica não mostram se um determinado agregado causará expansões deletérias no concreto, para isto deverá ser utilizado outro método de ensaio.

#### **2.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura**

Este método possibilita classificar os diversos tipos de géis formados pela RAA. Pode-se também identificar as bordas de reação na interface da pasta com o agregado e a existência de gel álcali-silicoso disperso na argamassa, poros e fissuras do agregado.

Primeiramente, as amostras, argamassa ou concreto, devem passar por uma análise visual, através de uma lupa estereoscópica, para identificar os pontos de interesse. Após, serão analisadas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), sendo possível correlacionar as diversas morfologias características dos produtos encontrados e os seus produtos químicos.

A MEV é uma técnica muito importante, pois permite análises em grandes ampliações, possibilitando a identificação precisa dos produtos de RAA. Pode-se verificar a

deterioração da estrutura devido à concentração dos produtos e classificar os vários tipos de géis formados.

#### **2.4.3 Ensaio Acelerado – ASTM C- 1260 (2001)**

Desenvolvido por OBERHOLTER em 1985 (NBRI- National Building Research Institut South Africa), nele utiliza-se as barras fundamentadas no método ASTM-C-227 e NBR 9773, adicionadas de uma solução de NaOH em uma temperatura de 80°C por um período de 28 dias.

Deverão ser realizadas 3 amostras as quais terão uma leitura diária da expansão, sendo a do 16º dia a de referência para comparação com o valor limite. Se as expansões forem inferiores a 0,10% no 16º dia, indica-se um comportamento inócuo. Porém, se ocorrerem transformações superiores a 0,20%, indicam que existe grande possibilidade da ocorrência de expansões nocivas. Se os valores ficarem compreendidos entre 0,10% e 0,20%, sugere-se que sejam feitas investigações adicionais.

#### **2.4.4 Ensaio Químico - ABNT BR-9774 (1987); ASTM C-289 (1994)**

Utiliza-se um agregado graúdo, retido na peneira nº 100 (0,150 mm) ABNT, imergido em uma solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) a 1 N, a 80°C por 24 horas. Em seguida, determina-se a sílica dissolvida pelo método gravimétrico ou por fotometria e a redução da alcalinidade da solução de NaOH. Através da demonstração na Figura 9, e com os valores obtidos nesse ensaio, é possível classificar a potencialidade do agregado estudado em: inócuo (não reativo), deletério (material reativo) e potencialmente deletério.



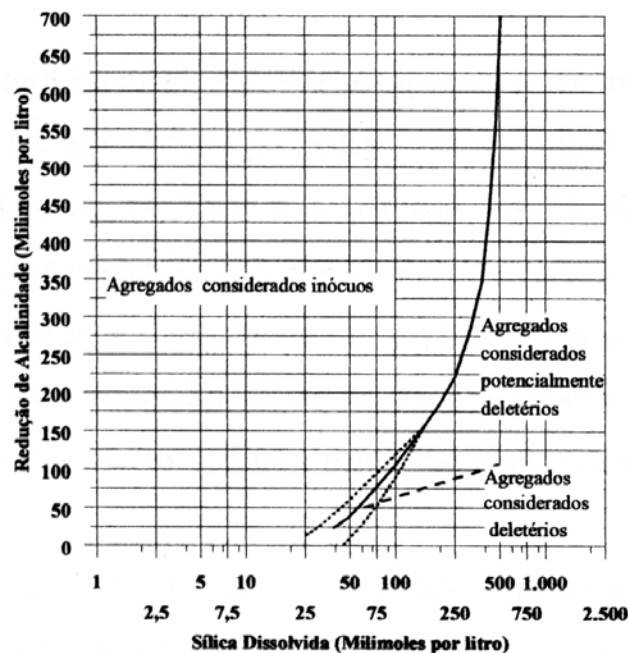


Figura 9. Classificação reativa do agregado (NBR 9774, 1987)

Esses resultados devem ser analisados com outros métodos, pois não se caracteriza como um ensaio totalmente confiável.

#### 2.4.5 Ensaio das Barras de Argamassa - ABNT NBR-9773(1987); ASTM-C-227 (1990)

Ensaio bastante utilizado que tem por objetivo investigar a reação álcali-sílica a partir da análise das variações do comprimento de barras de argamassa, as quais se encontram em atmosfera saturada de vapor d'água a 38°C em recipientes hermeticamente saturados.

Deve-se preparar 4 amostras com relação cimento:agregado 1:2,25, com dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm. O cimento deve apresentar elevado equivalente alcalino, a água de mistura deve corresponder a um índice de consistência entre 105 % e 120 %.

Após o desmolde, são realizadas leituras de comprimento das amostras em intervalos de tempo que são: 24h; 14 dias; 1 mês; 2 meses; 4 meses e 6 meses. Os resultados devem ser expressos em porcentagem de expansão, obtidos da média das 4 barras.

Expansão que excederem 0,05% aos 3 meses ou 0,10% aos 6 meses serão consideradas excessivas, podendo ocasionar reações nocivas.

#### **2.4.6 Ensaio do Prisma de Concreto – ASTM C-1293 (1995)**

##### **2.4.6.1 Avaliação da reação álcali-silica**

Através da variação do comprimento de prismas de concreto, avalia-se, pela expansão, a potencialidade reativa do agregado como agente na reação álcali-silica com os íons alcalinos. Deve-se utilizar para preparo das amostras de concreto (3 prismas de concreto com dimensões de 75 mm x 75 mm x 285mm) com agregado miúdo não reativo (expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias- método ASTM C-1260, 1994). O agregado graúdo ( $d_{max}$  19 mm) deve corresponder a 70% do volume do concreto e em frações de 33% de: 19 mm, 12,5 mm e 9,5mm em peso. A relação água/cimento (a/c) deve estar entre 0,42 e 0,45 em massa. Para aumentar o teor alcalino é dissolvido NaOH a 1N na água de mistura.

A leitura que servirá de referência deve ser feita logo após o desmolde da amostra à idade de  $23,5 \pm 0,5$  hora. Depois disso, ela deverá permanecer em ambiente climatizado com temperatura de  $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Serão feitas leituras aos 7 dias, 28 dias, 56 dias, 3 meses, 6 meses, 9 meses e 12 meses.

Segundo a ASTM C-1293 (1995), o agregado será considerado deletério se ocorrer expansão superior a 0,04% em 12 meses.

##### **2.4.6.2 Avaliação da Reação Álcali-Carbonato – ASTM C-1105 (1995)**

Através da variação de prismas de concreto confeccionados com determinados agregados dolomíticos (dolomitos calcíticos ou calcários dolomíticos), avalia-se a potencialidade de reação de rochas carbonáticas. Os agregados e o cimento utilizados devem ter as condições descritas no método da ASTM C-1293 (1995).

Deve-se preparar 6 prismas de concreto de 75 mm x 75 mm x 285 mm. A dosagem deve seguir as instruções da ASTM C-233 (1993a). O desmolde deverá ser após 24 horas de

cura em água saturada com cal a 23°C por no mínimo 30 minutos. Em seguida é feita a primeira leitura de referência. A próxima leitura será realizada no 7º dia. Na seqüência, os prismas são colocados em câmara úmida, sem imersão de água, sendo realizadas leituras aos 56 dias, 3 meses, 6 meses, 9 meses e 12 meses.

Será considerada uma expansão com potencial deletério na combinação cimento:agregado, se ocorrerem expansões superiores a 0,015% aos 3 meses; 0,025% aos 6 meses, ou 0,030% a 12 meses. Esses valores serão obtidos através da média das 6 amostras.

#### **2.4.7 Ensaio do Cilindro de Rocha - ABNT NBR-10340 (1988); ASTM C-586 (1992)**

Este método é utilizado para avaliar as características expansivas das rochas carbonáticas.

O testemunho cilíndrico deve possuir diâmetro de 9 mm e comprimento de 35mm, e será imerso em água destilada até ocorrer a variação mínima de comprimento ( $< 0,02\%$ ). Nessa fase será realizada a primeira leitura de referência; em seguida, a mostra é imersa em um recipiente com solução de NaOH. Sela-se e mantém-se o conjunto em temperatura ambiente de 23°C + 2°C. Através de um aparelho comparador, serão realizadas leituras de comprimento nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias e subseqüentes em intervalos de 4 semanas. Segundo a norma americana (ASTM C-586, 1992), expansões superiores a 0,10% são um indicativo de ocorrência RAA.

#### **2.4.8 Ensaio Térmico (Osipov)**

Este método, proposto pelo Engenheiro ALBERT OSIPV do Institute Hydroproject - Moscou, é realizado submetendo-se o agregado graúdo (diâmetro entre 20 mm a 50 mm) à temperatura de 1000°C durante um período de 60 segundos.

Caso o agregado se fragmente durante esta exposição, será considerado reativo. Caso não ocorra a desfragmentação, não será possível definir suas propriedades deletérias, devendo utilizar-se outras metodologias.

#### **2.4.9 Ensaio GEL-PAT**

Desenvolvida por STANTON em 1942, aplica-se apenas em agregados graúdos, os quais são colocados em uma matriz de pasta de cimento com uma das faces expostas. Após a cura, o material é imerso em uma solução alcalina com temperatura controlada, e a face exposta do agregado é examinada com o auxílio de uma lupa estereoscópica para verificar a formação do gel. Essa metodologia não tem sido utilizada.

#### **2.4.10 Ensaio em Autoclave**

Esse método teve origem no Japão. Para realização deste ensaio são moldadas 3 barras com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm, com relação de cimento:agregado de 1:2 e relação a/c = 0,5. Elas são armazenadas por um período de 5 horas em autoclave a uma temperatura entre 110 °C a 130 °C e pressão entre 0,10 MPa e 0,20 MPa.

Considera-se o agregado como não-reativo quando não ocorrem fissuras aparentes; a variação do módulo de elasticidade não deve superar 15 % e a variação de propagação sonora 5%.

#### **2.4.11 Ensaio de Contraste Químico – Acetato de Urânio**

Esse método considera que o concreto contendo gel, formado pela reação álcali-silica, provoca troca iônica com a solução de acetato de urânio.

Ao submeter a amostra à ação de raios ultravioletas, uma coloração amarelo-esverdeado permitirá a identificação do produto expansivo da RAA.

#### **2.4.12 Ensaio CSA A –23.2 – 26A – Método Químico Canadense**

Este ensaio verifica a reatividade potencial do agregado (rochas carbonáticas) com os álcalis do cimento, fragmentando-se a rocha com dimensões inferiores a 0,16 mm para a determinação de CaO, MgO, e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 2.4.13 Ensaio CSA A 23.2 – 25A – Método Canadense das Barras

Este método verifica a expansão de barras de argamassa expostas à temperatura de 80°C em solução de NaOH.

### 2.4.14 Determinação do Índice de Deterioração do Concreto

Baseado na metodologia desenvolvida por GRATTAN-BELLEW & AIR DANAY (1992) (apud HASPARYK, 1999), este método estabelece índices de deterioração do concreto através da classificação das amostras de concreto devido aos danos provocados pela RAA. Este índice é obtido sobre superfícies polidas do testemunho, preparadas a partir de cortes longitudinais. Estes devem gerar em torno de 100 quadrados (áreas de 15 mm x 15 mm), que serão examinados individualmente em microscópio estereoscópico. Em seguida, atribui-se um fator ao número total de cada tipo de defeito, conforme tabela 3. Após a soma dos resultados obtidos através da atribuição dos pesos, calcula-se o índice de deterioração do concreto (Di). GRATTAN-BELLEW & DANAY (1992) consideram como referência “não-reativa” um índice de deterioração com valor igual ou menor a 17.

**Tabela 3 - Fatores de Multiplicação para o Índice de Deterioração (GRATTAN-BELLEW & AIR DANAY, 1992) (apud HASPARYK, 1999).**

| TIPO DE DETERIORAÇÃO                           | FATOR DE MULTIPLICAÇÃO |
|--|------------------------|
| Fissura no agregado                            | 0,25                   |
| Borda de reação em torno dos agregados         | 0,50                   |
| Vazios revestidos ou preenchidos com gel       | 0,50                   |
| Fissura com gel no agregado graúdo             | 2,00                   |
| Fissura na pasta de cimento                    | 2,00                   |
| Deslocamento entre a pasta e o agregado graúdo | 3,00                   |
| Fissura com gel na pasta                       | 4,00                   |

### 2.4.15 Avaliação da Eficiência de Materiais Pozolânicos – NBR 12.651 (1992) e ASTM C-441 (1996)

Esse método tem por finalidade mostrar a eficiência da utilização de materiais pozolânicos, tais como adições minerais ou escória de alto-forno, como forma de prevenir expansões excessivas causadas pela RAA.

Nele são realizados dois testes: ensaio e controle. Para cada um moldam-se 3 barras com dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm, sendo empregados como agregado reativo, o vidro pirex e cimento Portland com elevado equivalente alcalino, incluindo a adição de material pozzolânico (25% de substituição de cimento). Para as barras de controle não se utilizam a adição.

De acordo com a NBR 9773 (1987) e ASTM C – 227 (1990), são feitas a estocagem e leitura dos comprimentos das barras. Após 14 dias compara-se a redução da expansão entre os dois testes.

## **2.5 FATORES QUE INTERFEREM NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.**

Existem diversos fatores que influenciam na reação álcali-agregado, uma vez que o concreto é um agrupamento muito complexo de diferentes tipos de materiais com características físicas diversas, as quais geram um produto final (concreto) com condições ideais para a reação, mesmo que se utilize materiais não reativos ou cimento com baixo teor de álcalis (PAULON, 1981).

Segundo HASPARYK (1999), os fatores mais importantes que influenciam a reação são: cimento e agregado (propriedade dos materiais); umidade, temperatura e tensões de compressão (influências externas) e o tempo.

### **2.5.1 Teor de Álcalis do Cimento**

De acordo com HASPARYK (1999), os álcalis são encontrados no cimento de duas formas:

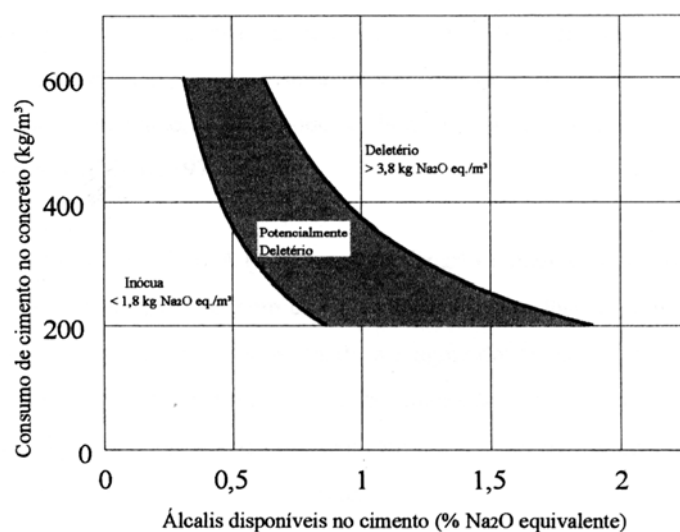
- Álcalis Solúveis: presentes nos sulfatos alcalinos (representam de 10 % a 60% dos álcalis totais);
- Álcalis Insolúveis: provenientes das soluções sólidas das fases presentes no clínquer.

Os álcalis solúveis geram um aumento do pH da solução nos poros do concreto, ocasionando aumento na concentração dos íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) que são responsáveis pela RAA, isto é, a formação destes íons está condicionada à quantidade de álcalis no cimento.

Segundo a ASTM C- 150 (1997), um cimento é considerado com baixo teor de álcalis se o equivalente alcalino não exceder 0,6%.

Porém, simplesmente o fato de considerar a preparação do concreto com baixo teor de álcalis ( $< 0,6\%$ ) não garante que não ocorra a reação, e por conseguinte, a expansão no concreto (WOLF, 1952; KIHARA, 1986). Existem outras maneiras dos álcalis penetrarem no concreto, seja através de águas que estejam em contato com a massa ou por meio de adições, aditivos e agregados (DIAMOND, 1975; KIHARA, 1986).

Em estudos realizados por KROGH (1973) e SPRUN (1975), na Alemanha, foi demonstrado que existem menores probabilidades de ocorrer reações, se for considerada a quantidade de álcalis no volume do concreto ao invés do valor do teor de álcalis no cimento, sem levar em conta a sua dosagem no concreto. Atualmente está sendo considerado o teor de álcalis totais ou solúveis por metro cúbico de concreto, levando em consideração o consumo de cimento (HASPARYK, 1999). A Figura 10 apresenta os limites deletérios à reação, considerando-se o consumo de cimento no concreto e o teor de álcalis disponíveis no cimento.



**Figura 10. Classificação do potencial da reação com relação entre a quantidade de álcalis e o consumo de cimento no concreto (OBERHOLSTER, et al 1983)**

Segundo OBERHOLSTER, VAN ARRPT & BRANDT (1983), os limites para o teor de álcalis totais ou solúveis por metro cúbico de concreto são os seguintes:

- Comportamento Expansivo:  $> 3,8 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$
- Comportamento Potencialmente Reativo: entre  $1,8 \text{ kg/m}^3$  e  $3,8 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$
- Comportamento Inócuo:  $< 1,8 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$

A NBR 12653 (1992) e ASTM C- 618 (1997) limitam o teor de álcalis expressos em  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  (equivalentes de sódio), nas adições minerais e pozolanas, em 1,5%.

### 2.5.2 Agregados

São vários os fatores que ocasionam reação devido ao agregado utilizado na mistura. Entre eles destacam-se (Bulletin 79,1991):

- Constituintes Mineralógicos: Tipo, histórico tectônico e de alteração.
- Relativos à rocha: estrutura, tamanho dos grãos, porosidade, permeabilidade, área específica e composição.

Um agregado terá mais poder de reação quanto mais desorganizada e instável for sua estrutura, como os materiais com estrutura amorfa (opala e vidro), microcristalina e criptocristalina (calcedônia). Consideram-se como menos reativos os minerais metaestáveis (tridimita e cristobalita) e cristilinos (quartzo e feldspato deformados e filossilicatos alterados) (BULLETIN 79, 1991; HASPARYK,1999).

Outro fator que aumenta o poder de reação dos agregados são as alterações em rocha, que causam distorções resultantes de deformações tectônicas; como exemplo pode-se citar o quartzo.

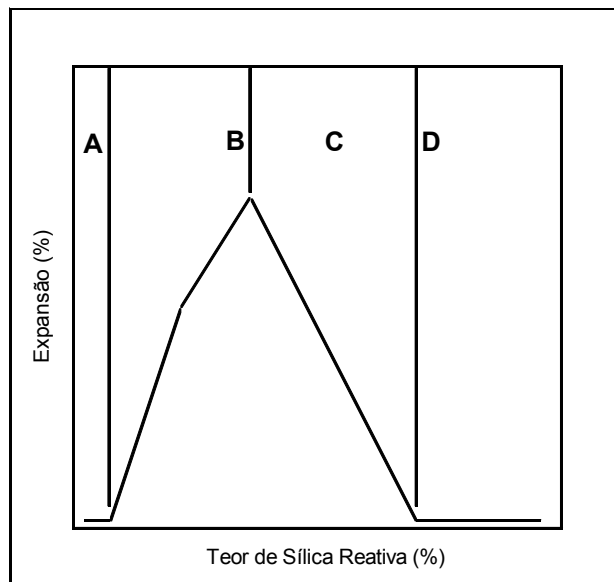
Segundo PAULON (1981), em ensaios realizados por STANTON, VIVIAN, JONES e WOOLF, analisou-se a expansão do concreto com diferentes porcentagens de



agregados reativos, no caso, um tipo de flint poroso. Verificou-se a ocorrência de valores da expansão num intervalo denominado de “perigoso”, com porcentagem de material reativo entre 12% e 25 %.

PAULON (1981) explica que para quantidades baixas de agregado reativo, a expansão aumenta com a porcentagem, mas a partir de um determinado valor a redução alcalina atinge um outro valor, onde não ocorre a formação do gel expansivo. Ocasionalmente, no entanto, uma diminuição da resistência mecânica, devido à reação atingir o centro dos agregados.

A Figura 11 mostra a expansão devido ao teor de sílica reativa, dividida em 4 fases. Segundo HOOBS (1988), na região “A”, há a ocorrência de reação sem causar fissuração. Em “B”, existe um excesso de álcalis em relação à sílica, ocorrendo a reação no concreto endurecido, levando à fissuração. Em “C”, o teor de sílica é maior do que o de álcalis, ocorrendo reação e fissuração. Na região “D”, o excesso de sílica em relação aos álcalis, faz com que estes sejam rapidamente consumidos pela sílica, não causando dano.



**Figura 11. Influência da porcentagem de agregados reativos sobre a expansão do concreto (HOBBS, 1988).**

Em experimentos realizados por VIVIAN (1951), comprovou-se que o tamanho dos agregados reativos é um fator importante da reação. A presença de agregados reativos de

dimensão muito pequena (material menor que 0,050 mm) provoca uma reação antes que o gel tenha se formado. Devido à grande superfície específica, grandes quantidades de materiais finos fazem com que a concentração de álcalis seja rapidamente reduzida, impedindo a reação secundária nos agregados maiores, a qual provocaria a formação do gel expansivo.

Segundo PAULON (1981), esse fato explicaria porque particularmente grãos médios ou grossos parecerem provocar o efeito destrutivo sempre que houver ausência de areias reativas.

COLLINS & BAREHAM (1987) afirmam que a utilização de agregados porosos diminuem as expansões de RAA. Os ensaios foram realizados com areia reativa e agregados porosos. O gel que se forma tende a acomodar-se nos poros do agregado, assim como a diluição de álcalis pela água absorvida neste agregado.

A Tabela 04 apresenta um resumo dos agregados, seus componentes reativos e a natureza da reação álcali-agregado (KIHARA 1979, EQUIPE DE FURNAS 1997).

**Tabela 4 - COMPONENTES REATIVOS DOS AGREGADOS**

| Tipo de Agregado   | Fase Mineralógica Reativa  | Natureza da Reação                                       |
|--|--|--|
| <b>GRUPO I - ROCHAS METAMÓRFICAS</b>   |  |  |
| Granulito<br>Gnaiss<br>Quartzito<br>Xisto  | > 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$  | Álcali - Silicato  |
| Filitos<br>Hornfels<br>Argilito  | > 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$ ; quartzo microcristalino a criptocristalino                          | Álcali - Silicato  |
| <b>GRUPO II - ROCHAS SEDIMENTARES</b>  |  |  |
| Arenito  | > 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$<br>Opala e Calcedônia.  | Álcali - Silicato<br>Álcali - Sílica                     |
| Grauvaca   | > 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$ ; quartzo microcristalino a criptocristalino                          | Álcali - Silicato  |
| Chert<br>Calcário  | Calcedônia, opala, quartzo criptocristalino e microcristalino<br>Calcita/dolomita, próxima a 1 e associado a argilominerais<br>Opala, Calcedônia | Álcali - Sílica<br>Álcali - Carbonato<br>Álcali - Sílica |
| <b>GRUPO III - ROCHAS MAGMÁTICAS</b>   |  |  |
| Granito<br>Granodiorito  | > 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$   | Álcali - Silicato  |
| Basalto  | Minerais de alteração: patagonita, opala, calcedônia<br>Vidro vulcânico básico   | Álcali - Sílica<br>Álcali - Sílica                       |
| Pedra Pomes<br>Riolito<br>Andesito<br>Dacito<br>Latitos<br>Perlitos<br>Tufos Vulcânicos<br>Fonolitos | Vidros vulcânicos ácidos a intermediários e tridomita  | Álcali - Sílica  |
| <b>GRUPO IV - MINERAIS E OUTROS</b>  |  |  |
| Areia  | Opala ( $> 0,25\%$ ), Calcedônia ( $> 3\%$ )<br>Eventualmente quartzo deformado  | Álcali - Sílica<br>Álcali - Silicato                     |

Fonte: Concreto – Ensaio e Propriedades. Equipe de Furnas, 1997.

### 2.5.3 Umidade

A presença de umidade é um fator essencial para ocorrência de reação álcali-agregado. Os principais casos conhecidos de reação expansiva ocorrem em obras como: barragens, fundações diretas e pontes. Na ausência de água ou umidade, a RAA pode não ocorrer, mesmo na presença de agregados reativos e álcalis (BICZOK, 1972).

Diversos pesquisadores como KIHARA (1986), TOMOSAWA, TAMURA & ABE (1989) verificaram que a umidade relativa acima de 85% tende a ocasionar expansão. A migração dos álcalis ocorre pelo gradiente de umidade e diferença de potencial elétrico, o deslocamento dos álcalis dá-se das partes úmidas para as partes secas do concreto (XU & HOOTON, 1993).

MEHTA & MONTEIRO (1994) dizem que a presença de umidade junto à estrutura é essencial para que a expansão ocorra, devendo ser impedido o acesso de água através de imediato reparo de quaisquer juntas com vazamento.

#### **2.5.4 Temperatura**

A presença de temperaturas elevadas nas estruturas de concreto acelera as reações, ocasionando um aumento nas expansões na medida que se eleva a temperatura (PAULON, 1981). Em condições como esta, o gel torna-se mais viscoso, podendo percorrer com mais facilidade os vazios e as fissuras do concreto (HASPARYK, 1999).

#### **2.5.5 Tensões de compressão**

Segundo PAPPALARDO (1998), a expansão e danos devido a RAA são bastante influenciados por tensões de compressão aplicadas ou induzidas. A expansão será reduzida na direção dos esforços de compressão, local onde não circulará água por não ocorrerem fissuras. SILVEIRA (1997) relata que as baixas taxas de expansão em barragens de arco, em comparação às estruturas de gravidade, são devidas à existência das tensões confinantes.

#### **2.5.6 Tempo**

O fator tempo não é determinante para a ocorrência do fenômeno RAA (HASPARYK, 1999). As expansões podem ocorrer em poucos anos, como é o caso da Usina Apolônio Sales (3 anos após a construção), como também podem ocorrer após vários anos, caso da Usina de Furnas (13 anos após a conclusão da obra). As expansões ocorrem enquanto os minerais reativos do agregado estiverem sendo consumidos.

## **2.6 EFEITO DE ADIÇÕES NA REDUÇÃO DA EXPANSÃO DEVIDO À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.**

Em casos onde não seja possível dispor do uso de agregados não-reativos, o conteúdo total de álcalis deve ser reduzido pela substituição de parte do cimento de alta alcalinidade por adições cimentantes ou pozolânicas, tais como escória granulada de alto forno, vidro vulcânico (pedra pome moída), argila calcinada, cinza volante ou sílica ativa (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Misturas químicas como sais de Lítio, Hidróxido de Lítio, Sulfato de Cobre, pó de Alumínio, entre outros, também são capazes de reduzir significativamente a reação álcali-agregado (RAMACHANDRAN, 1998).

Serão descritos, na seqüência, os principais tipos de adições, capazes de reduzir a expansão devido ao fenômeno RAA.

### **2.6.1 Adições Químicas**

Segundo RAMACHANDRAN (1998), misturas químicas são capazes de influenciar as características do concreto, como: trabalhabilidade, ar incorporado, velocidade de hidratação, drenagem e aumento de resistência. Essas misturas, porém, não devem afetar as características físicas e químicas do concreto.

Nos últimos anos várias pesquisas estão sendo realizadas para combater as expansões devido às reações álcali-agregado no concreto, através de misturas químicas.

Os primeiros estudos com misturas químicas foram realizados por MCCOY e CALDWELL, em 1951 (apud RAMACHANDRAN, 1998). Os pesquisadores analisaram expansões em amostras com alto teor de álcalis no cimento e um agregado altamente reativo (vidro Pyrex), estas foram submetidas a várias misturas químicas. A tabela 05 mostra os efeitos que alguns sais causaram na expansão devido à reação álcali-agregado. Pode-se notar que os sais de Lítio foram os que ocasionaram maior percentual de redução na expansão.

**Tabela 5 - Efeitos de sais na redução de expansões em amostras (McCoey e Caldwell, 1951)**

| <b>Material</b>                                  | <b>Percentual adicionado</b> | <b>Percentual de redução na expansão</b> |
|--|------------------------------|--|
| Carbonato de Lítio – $\text{Li}_2(\text{CO}_3)$  | 1,00                         | 91                                       |
| Cloreto de Lítio – $\text{LiCl}$                 | 1,00                         | 88                                       |
| Fluoreto de Lítio – $\text{LiF}$                 | 0,50                         | 82                                       |
| Pó de Alumínio –                                 | 0,25                         | 75                                       |
| Carbonato de Lítio – $\text{Li}_2(\text{CO}_3)$  | 0,50                         | 62                                       |
| Sulfato de Lítio – $\text{Li}_2(\text{SO}_4)$    | 1,00                         | 48                                       |
| Sulfato de Cobre – $\text{Cu}_2(\text{SO}_4)$    | 1,00                         | 46                                       |
| Carbonato de Sódio – $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$  | 1,00                         | 44                                       |
| Carbonato de Amônia – $(\text{NH}_4)\text{CO}_3$ | 1,00                         | 38                                       |
| Cloreto de Lítio – $\text{LiCl}$                 | 0,50                         | 34                                       |
| Carbonato de Zinco – $\text{Zn}(\text{CO}_3)$    | 0,50                         | 34                                       |
| Cloreto de Cobre – $\text{CuCl}$                 | 1,00                         | 29                                       |
| Nitrato de Lítio – $\text{Li}_2(\text{NO}_3)$    | 1,00                         | 20                                       |
| Cloreto de Sódio – $\text{NaCl}$                 | 1,00                         | 15                                       |
| Fosfato de Cromo – $\text{Cr}(\text{PO}_4)$      | 1,00                         | 9  |
| Carbonato de Bário – $\text{Ba}(\text{CO}_3)$    | 1,00                         | 3  |
| Carbonato de Cálcio – $\text{Ca}(\text{CO}_3)$   | 1,00                         | -6                                       |

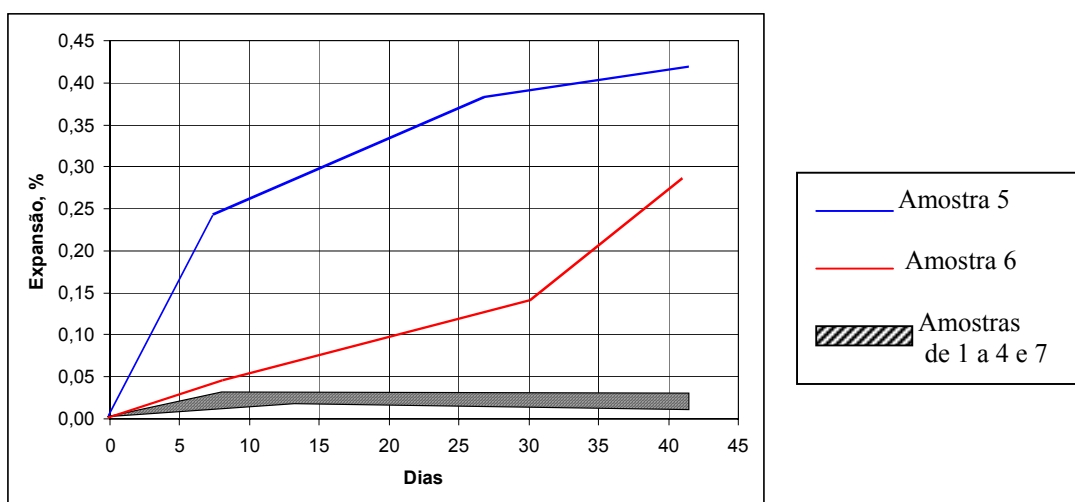
Através dos dados mostrados, pode-se concluir que sais de Lítio, Sulfato de Cobre e pó de Alumínio são capazes de diminuir significativamente a expansão.

RAMACHANDRAN (1998), afirma que o hidróxido de lítio é um aditivo eficiente que reduz a expansão causada pela RAA. O autor realizou ensaios acelerados com sete amostras na proporção de cimento:areia de 1:2,25 (Tabela 06), contendo hidróxido de Lítio ( $\text{LiOH}$ ), opala e quantidades diferentes de álcalis, e estudou suas expansões após colocar as amostras em uma autoclave com temperaturas de 25 °C, 38 °C e 130 °C.

**Tabela 6 – Composição das amostras estudadas por Ramachandran (1998).**

| Nº da amostra | Na <sub>2</sub> O equivalente | LiOH | Opala |
|---------------|-------------------------------|------|-------|
| 1             | 0,44                          | 0,00 | 0,00  |
| 2             | 1,20                          | 0,00 | 0,00  |
| 3             | 1,20                          | 0,50 | 0,00  |
| 4             | 1,20                          | 1,00 | 0,00  |
| 5             | 1,20                          | 0,00 | 5,00  |
| 6             | 1,20                          | 0,50 | 5,00  |
| 7             | 1,20                          | 1,00 | 5,00  |

Para as temperaturas de 25°C e 38°C, as amostras de 1 a 4 (Figura 12) apresentaram um comportamento não expansivo; já a amostra 5 obteve a máxima expansão, visto que continha 1,20% de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> e 5,00% de opala. A amostra 6, com a mesma quantidade da amostra 5 e 0,50% de LiOH a mais na mistura, reduziu a expansão, porém, após 30 dias, ocorreu uma tendência à expansão da amostra. A amostra 7, com 1,00% de LiOH, mostrou significativa redução na expansão até os 50 dias. O autor comenta que medições de longa duração devem ser realizadas para determinar se a dosagem é adequada para inibir a expansão.



**Figura 12. Expansão de amostras contendo LiOH (RAMACHANDRAN, 1998)**

O autor submeteu as amostras a uma temperatura de 130 °C por 5 horas, obtendo valores não-expansivos para as amostras de 1 a 4 e valores considerados expansíveis para as demais, inclusive a amostra 7. RAMACHANDRAN (1998) comenta que a expansão na amostra 7 ocorreu devido às mudanças na micro-estrutura e enfraquecimento nas ligações químicas do hidróxido de lítio (LiOH), provocado pelo tratamento em autoclave.

### 2.6.2 Adições Minerais

MEHTA & MONTEIRO (1994), com relação a concretos com aditivos minerais, descrevem que

A permeabilidade do concreto é fundamental na determinação da taxa de transferência de massa relacionada às ações químicas destrutivas, tais como a expansão álcali-agregado... Uma vez que a reação pozolânica envolvendo aditivos minerais é capaz de refinar os poros, o que reduz a permeabilidade do concreto, tanto os estudos de laboratório como os de campo, mostraram uma melhoria considerável na durabilidade química de concretos contendo aditivos minerais.

Ainda de acordo com os autores, os álcalis encontrados nas escórias e pozolanas são insolúveis em ácido, não reagindo com o agregado. Além disso, formaram uma alta relação sílica/álcali, originando produtos álcali-silicosos menos expansivos.

De acordo com a norma NBR 12653/92, *materiais pozolânicos são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes*. Podem ser de origem natural, como as rochas vulcânicas, ou de origem artificial, como as cinzas volantes.

Serão apresentadas, a seguir, adições minerais capazes de reduzir expansões causadas pela reação álcali-agregado.



### 2.6.2.1 Cinza Volante (Fly-Ash)

Cinza volante é a pozolana artificial mais comum. É um resíduo finamente dividido, obtido através da combustão do carvão em pedra ou pó transportado da câmara de combustão pelos gases descarregados em usinas termoeletricas. Apresenta partículas esféricas e de grande finura, o que significa que o material está prontamente disponível para reação com hidróxido de cálcio.

A adição desse material no concreto, para prevenir a reação álcali-agregado, tem se mostrado eficaz nos teores de 30% a 40% (NEVILLE, 1997; METHA & MONTEIRO, 1994). Segundo NIXON & GAZE (1981), quanto mais pozolânica é a cinza, mais intensa é a redução das expansões.

Pesquisas realizadas por SHAYAN, DIGGINS & IVANUSEC (1996) demonstraram que a adição da cinza volante é capaz de reduzir a alcalinidade da solução dos poros, resultando na prevenção da reação deletéria.

A permeabilidade do concreto, contendo cinza volante, pode ser reduzida de forma considerável após 28 dias de cura; portanto, de uma maneira geral, a resistência do concreto aos meios agressivos pode ser elevada.

### 2.6.2.2 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz é um resíduo gerado pela queima da casca do arroz que contém basicamente sílica, sem finalidade agrícola ou industrial. No entanto, é altamente reativa, podendo ser usada como adição pozolânica no concreto (METHA, 1977).

Dependendo do processo de queima da casca, as características da cinza podem variar bastante. O objetivo é o de se obter a sílica amorfa para agir como material pozolânico. Os principais fatores determinantes da qualidade da cinza são a temperatura, o tempo e o ambiente da combustão (COOK, 1984).

TAYLOR (1990) considera a ação físico-química da cinza de casca de arroz similar à sílica ativa, porém relata que a cinza de casca de arroz pode apresentar-se muito mais pozzolânica do que a sílica ativa.

Como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz adicionada ao concreto diminui a porosidade e a permeabilidade, aumentando a resistência (GASTALDINI, 1996).

A cinza de casca de arroz necessita de maior quantidade de água, exigindo a utilização de elevadas dosagens de superplastificantes (ZHANG & MALHOTRA, 1996).

Conforme ensaios realizados por HASPARYK (1999), o teor ótimo da pozzolana cinza de casca de arroz foi de 15%, mostrando maior eficiência independentemente do agregado. No entanto, o teor de 12% mostrou-se suficiente para reduzir as expansões a níveis aceitáveis por norma. De uma forma geral, o aumento do teor de adição reflete na diminuição das expansões. Na mesma pesquisa constatou-se um teor crítico de 8% para cinza de casca de arroz e agregados contendo basalto.

#### 2.6.2.3 Escória de Alto-Forno

A escória de alto-forno é um resíduo da indústria siderúrgica, que moído, desenvolve propriedades cimentantes, além de caráter pozzolânico. Essas propriedades, por terem reação bastante lenta, necessitam de um ativador para acelerar a hidratação.

Segundo TAYLOR a quantidade de água de amassamento requerida pode ser reduzida na presença da escória de alto-forno.

HOOPS (1982), em seus estudos demonstrou que a escória é mais eficiente que a cinza volante no combate a reação álcali sílica, agindo como diluidor dos álcalis, mas segundo STARK (1994), a hidratação da escória pode reduzir a taxa de difusão dos álcalis, produzindo um gel menos expansivo ou não expansivo.

Ensaio acelerados, feitos por DAVIES & OBERHOLSTER, constataram que 45% de escória eram necessários para prevenir a reação álcali-sílica, no entanto, em ensaios da ASTM C-227, o teor ideal foi de 37%

Apesar de combater a reação álcali-agregado, o teor de álcalis presente na escória deve ser investigado para não contribuir negativamente para a reação.

#### 2.6.2.4 Sílica Ativa ou Fumo de Sílica

Sílica ativa ou fumo de sílica é um subproduto da fabricação de silício metálico ou de ligas de ferro-silício. É considerada uma pozolana altamente reativa, podendo ser utilizada como material cimentício. Sua ação pozolânica é essencialmente a reação que ocorre com a cinza volante e o que a diferencia é a velocidade da ação da sílica ativa devido ao aumento da superfície de contato (ROBERTS, 1989).

Devido ao seu efeito de “microfiller”, a sílica ativa atribui uma estrutura mais densa e resistente ao concreto (TOUTANJI & EL KORCHI, 1995).

Apesar de formar o mesmo gel da reação, a adição da sílica ativa é capaz de reduzir significativamente as expansões (GUDMUNDSSON, 1979). Isso acontece porque a reação da sílica ativa, similar ao gel, acontece quando o concreto ainda está em estado plástico; portanto, nessas condições a reação não é capaz de causar expansões (TENOUTASSE & MARION, 1986; HOBBS, 1988; NEVILLE, 1997).

Segundo HOBBS (1988), o teor de sílica ideal para inibir a expansão da reação álcali-agregado deve ser estimado através de uma curva de expansão péssima. No entanto, diversas pesquisas indicam que o material é usado na proporção de 4% a 20%, em massa, variando caso a caso.

HOOTON (1993), que utilizou sílica ativa juntamente com pyrex, concluiu que 10%, em volume, de sílica foi o suficiente para manter as expansões abaixo do limite proposto pela norma.

CHEN, SOLES & MALHOTRA (1993) concluíram que a sílica ativa retarda as expansões causadas pelas reações álcali sílica e silicato, se for utilizado um teor superior a 15%. Para essas reações apresentou um teor péssimo de 5%. Contudo, essa adição não se mostrou eficiente ao combater a reação álcali-carbonato. Esses mesmos pesquisadores também observaram que o teor de adição varia de acordo com o teor alcalino da sílica ativa.

DECHINI (1998), ao verificar a eficiência da adição variando a relação água/cimento, observou que (aos 30 dias) 15% de sílica ativa reduziu as expansões em 78% e 63% para as relações de 0,35 e 0,60, respectivamente.

Para saber a proporção ideal de sílica ativa a ser adicionada para reduzir os efeitos da reação álcali agregado, é necessário que se faça uma investigação quanto à reatividade do agregado (ACI COMMITTEE 234, 1995).

Segundo BAUER, TOKUDOME e TAKASHIMA (1998), após serem estudados oito traços de argamassa e 24 traços de concreto com diferentes tipos de adições e quantidades, as conclusões foram as seguintes: a sílica ativa com 15% foi a que teve melhor desempenho.

Segundo HASPARYK (1999), o teor ótimo da pozolana sílica ativa foi de 15%, mostrando maior eficiência independentemente do agregado. No entanto, o teor de 12% mostrou-se suficiente para reduzir as expansões a níveis aceitáveis por norma. Na mesma pesquisa constatou-se um teor crítico de 4% de sílica ativa e agregados contendo basalto.

#### 2.6.2.5 Agregado Pulverizado

Esse tipo de adição ainda é pouco investigado, no entanto percebeu-se nesse material o poder de reduzir as expansões causadas pela RAA (HASPARYK 1999).

ALMEIDA (1991), afirma que no processo de britagem a rocha libera energia, tornando os materiais finos, aglomerantes.

Conforme ensaios realizados em furnas, a redução das expansões pode variar de 20% a 60%, dependendo do tipo de agregado utilizado.

CASTRO et al. (1997) observaram que o tempo de utilização desta adição influencia na redução das expansões, que a utilização parcial desse material, como areia artificial em combinação com 100% de cimento, também é eficiente na redução da expansão.

### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 METODOLOGIA**

Neste capítulo são apresentados os procedimentos para preparação dos corpos-de-prova extraídos da barragem da UHE de Mascarenhas, bem como os ensaios realizados para análise do potencial de reatividade do concreto existente nesta Usina. Foram realizados os seguintes ensaios com os corpos-de-prova:

- Microscopia Eletrônica de Varredura;
- Análise Petrográfica;
- Reatividade Potencial através do método de imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1N, água deionizada e estufa todos a 80°C;
- Compressão simples de acordo com a NBR 5739/94;
- Módulo de elasticidade de acordo com a NBR 8522/84.

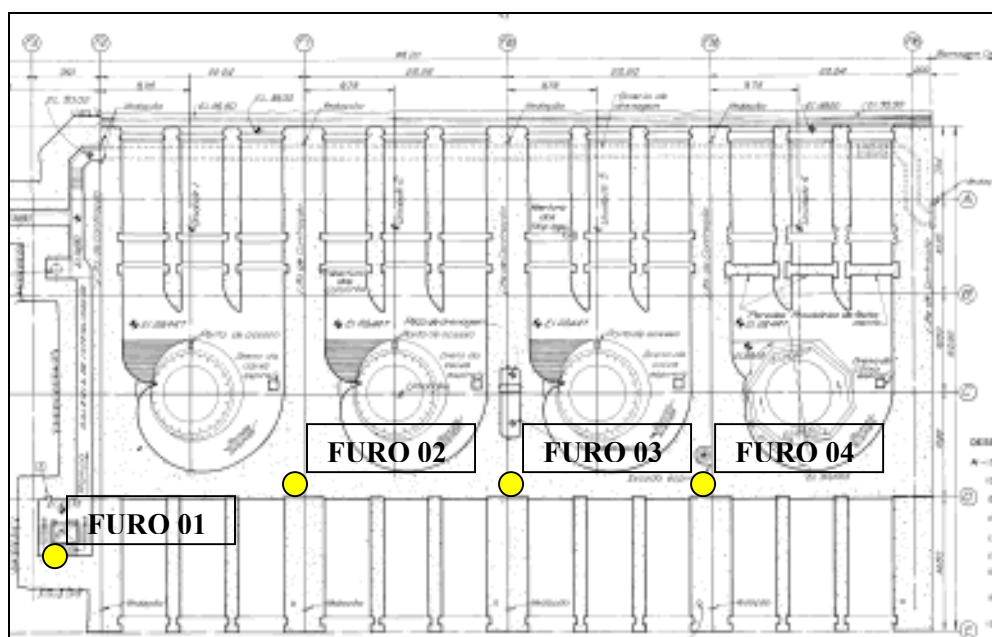
A fim de validar o ensaio de Reatividade Potencial, foi feita uma comparação com o ensaio acelerado, segundo a ASTM C 1260-01.

##### **3.1.1 Inspeção da barragem e extração dos corpos-de-prova.**

De acordo com ALVES et al (1997), uma das formas de prevenir a RAA é através de ensaios de laboratório com os materiais a serem utilizados no concreto, porém, quando uma estrutura apresenta suspeita de RAA é necessário uma inspeção “in situ” e a extração de testemunhos de concreto para ensaios laboratoriais.

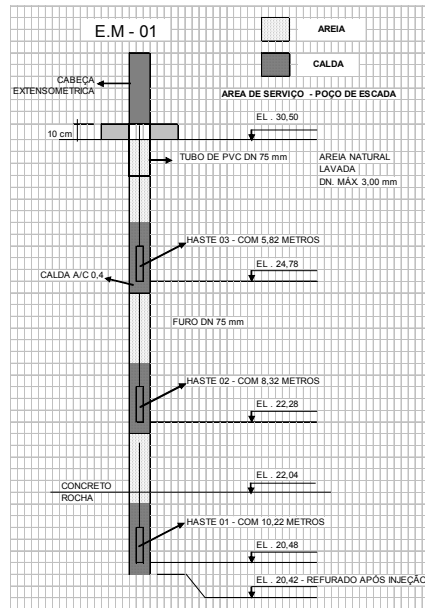
Através da visita realizada pelos consultores do assunto sobre Reação Álcali-Agregado, Vladimir Antonio Paulon e João Francisco Silveira, definiram-se 04 pontos (furos verticais) para a inserção dos equipamentos (extensômetros múltiplos) na galeria de inspeção, conforme Figura 13.

Os mesmos furos executados para instalar os instrumentos de monitoramento da expansão volumétrica do concreto (extensômetros múltiplos) foram utilizados para a retirada dos testemunhos de concreto que serviriam para realização dos ensaios de laboratório.



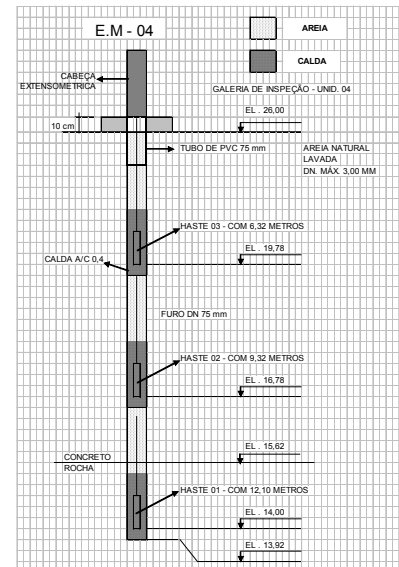
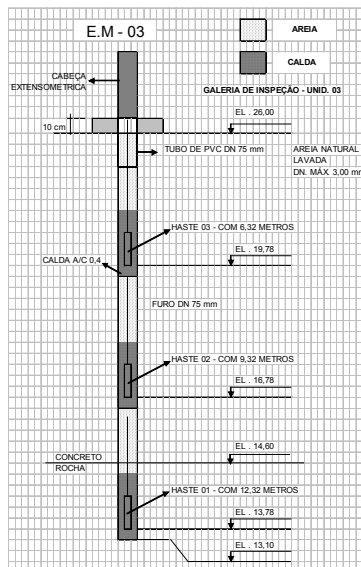
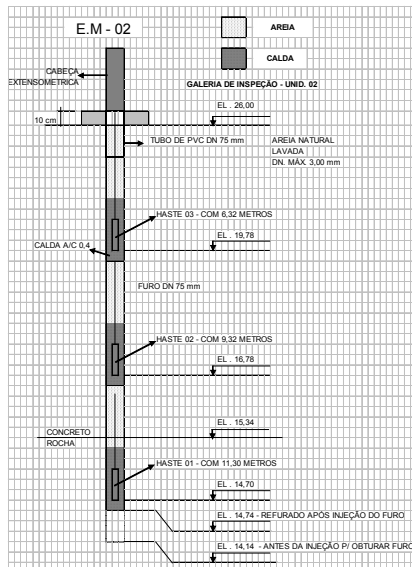
**Figura 13. Croqui com a localização dos furos (galeria de inspeção).**

O início do furo 01 encontra-se na elevação 30,5 m, no poço da escada que dá acesso à galeria de inspeção. Foram perfurados 8,46 m no concreto e 1,62 m na rocha, totalizando 10,08 m de profundidade (Figura 14).



**Figura 14. Esquema de instalação do extensômetro múltiplo 01**

Os furos 02, 03 e 04 (figura 15) encontram-se na elevação 26,0 m da galeria de inspeção. Para a instalação do extensômetro, cada furo foi perfurado aproximadamente 10,5 m no concreto e 1,5 m na rocha. Os furos foram realizados no sentido vertical devido às pequenas dimensões da galeria 1,65 x 2,30 m.



**Figura 15. Esquema de instalação dos extensômetros múltiplos 02, 03 e 04.**

O extensômetro múltiplo 2 foi instalado juntamente com um termômetro digital para verificar a temperatura do concreto no local. Essa é uma medida importante, tanto para a RAA, quanto para a segurança da barragem em si, porque quanto maior a temperatura, mais acelerada a reação, e variações na temperatura podem indicar diversos tipos de acontecimentos no corpo da barragem, permitindo medidas preventivas.

As Figuras 16 e 17 mostram os equipamentos utilizados para perfuração, bem como a dificuldade de manuseio, devido às pequenas dimensões da galeria de inspeção.



a)



b)

**Figura 16. Montagem do equipamento para perfuração do furo 01. Na figura A, nota-se o pré-furo, executado com extratora de menor porte. Em B, tem-se uma visão melhor do furo 01.**



**Figura 17. Extração de corpos-de-prova na galeria de inspeção da barragem.**

Além das amostras extraídas, foi decidida a retirada de corpos-de-prova de concreto em locais de grande umidade e probabilidade de ocorrência de RAA, com o auxílio de uma pequena extratora de concreto (HILTI).

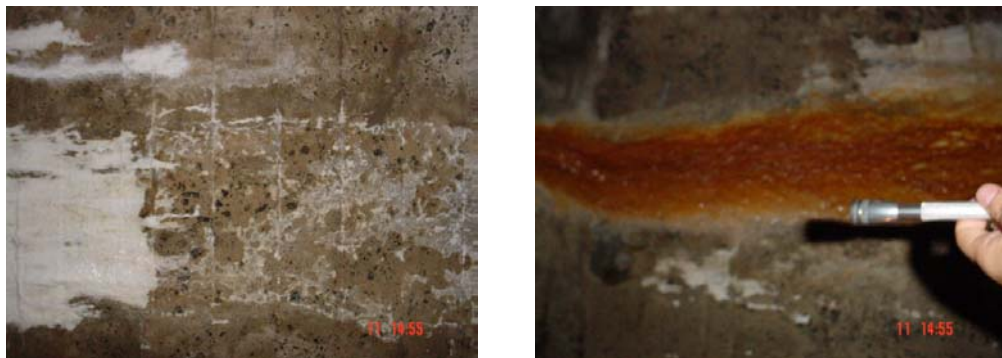
O local escolhido para a retirada preliminar de corpos-de-prova foi a galeria de drenagem da barragem por ser o local de acesso mais próximo à montante da barragem e por



apresentar grande umidade (atua como catalisador da RAA). Pode-se verificar a umidade e carbonatação da galeria de drenagem conforme as figura 18 e 19.



**Figura 18. Umidade e lixiviação nos locais de retirada de testemunhos de concreto.**



**Figura 19. Presença de lixiviação e produtos derivados de corrosão na galeria de drenagem.**

Depois de identificados os locais com condições favoráveis à RAA, foram marcados 05 pontos em locais distintos na galeria de drenagem da barragem para extração dos corpos-de-prova (Figura 20).



**Figura 20. Marcação dos locais de extração de concreto.**

Após a marcação dos locais de extração, foi instalada a extratora (HILTI) de pequeno porte que permite a retira de amostras de 7,5 cm de diâmetro (figura 21).



**Figura 21. Instalação do equipamento de extração e início da retirada dos corpos-de-prova**

Foram realizadas perfurações de 1m a 1,5 m, sempre tomando o devido cuidado de desviar a armadura.

As figuras 22 e 23 seguintes mostram a retirada do concreto após a perfuração com a extratora.



**Figura 22. Processo de retirada do concreto após a perfuração com extratora.**



**Figura 23. Retirada do testemunho de concreto**

Após a extração do concreto, o testemunho foi seco superficialmente, pois a extratora utiliza água no processo de perfuração, deixando umidade na superfície do concreto (Figura 24.a). Em seguida, foi identificado com caneta permanente (Figura 24.b), embalado com filme plástico para não perder a umidade interior e, então, acondicionado no recipiente de transporte da Usina até o laboratório (figura 25).



**Figura 24.a) Secagem superficial do concreto extraído. b) Identificação das amostras de acordo com o local de extração e a profundidade de retirada.**



**Figura 25. Embalagem em filme plástico do concreto para preservar a umidade interior e acondicionamento do concreto no recipiente de transporte.**

A etapa seguinte à retirada dos corpos-de-prova de concreto foi o preenchimento do furo com graute de resistência aproximada de 45MPa com 24 horas. O material foi adquirido pronto, e somente a mistura foi efetuada no local (Figura 26). Após o lançamento do material que permitiu o perfeito fechamento do orifício, foi finalizada a operação.





**Figura 26. Preparação do graute e preenchimento do furo deixado pela extração do concreto.**

A fim de coletar uma amostra representativa, tomou-se o cuidado para retirar corpos-de-prova dos quatro blocos que abrigam as máquinas.

### **3.1.2 Preparação dos corpos-de-prova.**

Com a chegada dos corpos-de-prova extraídos da barragem, deu-se início à preparação para realizar os ensaios laboratoriais, realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) da UFPR.

Primeiramente, os corpos-de-prova foram separados e identificados conforme o furo de sondagem e a profundidade da amostra. A figura 27 mostra as caixas com os corpos-de-prova e a marcação nos mesmos.



**Figura 27. Corpos-de-prova extraídos e identificação.**

Após identificados, os corpos-de-prova foram cortados em serra de disco de diamante com comprimento igual ao dobro do diâmetro, ou seja, 15 cm de comprimento para os

corpos-de-prova de 7,5 cm de diâmetro, e 11 cm de comprimento para os corpos-de-prova com 5,5 cm de diâmetro, conforme figura 28.



**Figura 28. Corpos-de-prova sendo serrados.**

Após serrados, os corpos-de-prova necessitaram de retificação para tornar as superfícies serradas planas e paralelas (figura 29).



**Figura 29. Corpos-de-prova sendo retificados.**

Após este processo de preparação, os corpos-de-prova já se encontravam preparados para os ensaios (figura 30).



**Figura 30. Corpos-de-prova preparados.**

### 3.1.3 Ensaios de laboratório com os corpos-de-prova extraídos da UHE Mascarenhas.

#### 3.1.3.1 Ensaio de reatividade potencial através dos métodos de imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH), água deionizada e estufa, todos a 80°C.

Este ensaio, fundamentado na ASTM C-1260/01, teve como objetivo verificar a potencialidade reativa do concreto retirado da barragem com relação à reação álcali-agregado. Para a sua realização, os corpos-de-prova foram submetidos a três condições: solução de hidróxido de sódio à concentração de 1 N, água deionizada e em estufa, todos a uma temperatura de 80 °C. Foi utilizado um total de 44 corpos-de-prova, sendo 29 testemunhos extraídos da galeria de inspeção e 15 corpos-de-prova extraídos da galeria de drenagem da barragem.

Após a preparação dos corpos-de-prova, item 3.1.2, realizou-se a medição inicial dos corpos-de-prova através de um micrômetro digital com precisão de três casas decimais (Figura 31), valor que serviu de base para a determinação das expansões medidas após a imersão dos corpos-de-prova nas condições descritas.



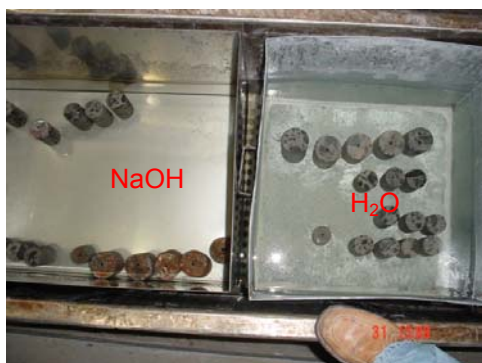
**Figura 31. Micrômetro com leitura digital.**

Após a leitura inicial, os cp's foram divididos e imersos em solução de hidróxido de sódio (NaOH) e água deionizada, em recipientes apropriados dentro de uma banheira com água a 80 °C (Figuras 32 e 33), e em estufa também a 80°C.





**Figura 32.** Banheira com água a 80 °C e recipientes com água deionizada e solução de NaOH.



**Figura 33.** Recipientes com cp's em solução de NaOH e água deionizada e em estufa a 80 °C.

As leituras feitas nos corpos-de-prova (Figura 34) foram realizadas periodicamente, sendo diárias no primeiro mês, e três vezes por semana a partir do segundo mês. Os valores lidos através do micrômetro digital foram transportados a uma planilha especial, para obtenção dos resultados e gráficos das expansões.



a)



b)

**Figura 34.** a) Suporte para apoiar corpos-de-prova para a realização de leituras. b) Leitura realizada com micrômetro em corpo-de-prova identificado.

### 3.1.3.2 Análise petrográfica

Para a análise ao microscópio óptico de luz transmitida (Figura 35) foram preparadas 10 lâminas delgadas de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  de espessura (Figura 36), para permitir a passagem de luz pelo concreto (VIEIRA, 1997). Elas foram confeccionadas com o concreto retirado da barragem, seis amostras dos furos 1 a 4, e com quatro amostras de concreto ensaiado no método acelerado (item 3.1.3.1).



**Figura 35. Microscópio Óptico de Luz Transmitida, Laboratório de Petrografia da Universidade Federal do Paraná - LAMIR.**



**Figura 36. Lâminas delgadas com aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  de espessura.**

De acordo com HASPARYK (1997), a análise petrográfica pode classificar os agregados presentes no concreto, bem como determinar produtos de RAA, tais como borda de reação ao redor do agregado, gel nos poros da argamassa e microfissuras causadas pela expansão do gel.



### 3.1.3.3 Microscopia eletrônica de varredura

Foram analisadas as superfícies de fratura tanto das amostras submetidas aos ensaios de reatividade (item 3.1.3.1), como das não submetidas, totalizando 25 amostras analisadas. O instrumento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca IEOL modelo 5800 (figura 37), do Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



**Figura 37. Microscópio eletrônico de varredura.**

De acordo com VALDUGA (2002), a análise de microscopia eletrônica de varredura não é um método de avaliação de RAA, pois não analisa diretamente os agregados, porém é um método que analisa os produtos da RAA realizado por algum outro tipo de ensaio ou em estruturas com reação já desencadeada.

A alta resolução e a grande profundidade de foco permitem que o MEV produza imagens com alta resolução (HASPARYK, 1999). Esse método identifica os componentes químicos e as diversas morfologias dos produtos encontrados (VEIGA, 1997). Pode-se observar o gel encontrado nos poros da amostra, na interface do agregado com a pasta, disperso na argamassa ou até mesmo nas fissuras do agregado (VALDUGA, 2002). É uma técnica de extrema importância para a identificação dos produtos de RAA.

Depois de reduzidas a um tamanho específico (Figura 38), as amostras passaram por um processo de metalização, por meio de recobrimento de uma fina camada de ouro, para que se tornassem visíveis ao MEV. Coladas em um suporte de amostras de alumínio com cola de prata, as amostras foram levadas ao MEV. Através do detector de elétrons secundários

pôde-se verificar os produtos de RAA através de sua morfologia. Com a técnica de espectrometria por energia dispersiva (EDS) verificou-se a composição química dos produtos formados pela RAA.

De acordo com a composição química dos géis (teores de Na e K), pode-se tentar correlacionar o grau de deterioração ao qual a estrutura está submetida, inclusive esclarecer o mecanismo da formação (VEIGA, GONÇALVES, ANDRADE, 1997).



**Figura 38. Preparação das amostras para microscopia.**

#### 3.1.3.4 Ensaio de resistência à compressão axial - NBR 5739/94

Para verificação das características mecânicas do concreto foi realizado ensaio de compressão axial, segundo a norma NBR 5739/94, utilizando 18 corpos-de-prova provenientes da galeria de inspeção da barragem (ensaios realizados no LAME/UFPR).

Os corpos-de-prova preparados, conforme item 3.1.2, foram capeados com enxofre (Figura 39) e levados à prensa de 30 toneladas para ruptura (Figura 40).



**Figura 39. Corpos-de-prova sendo capeados.**



a)



b)

**Figura 40.a) Ensaio de compressão axial (Prensa de 30 tf ). b) Corpos-de-prova rompidos.**

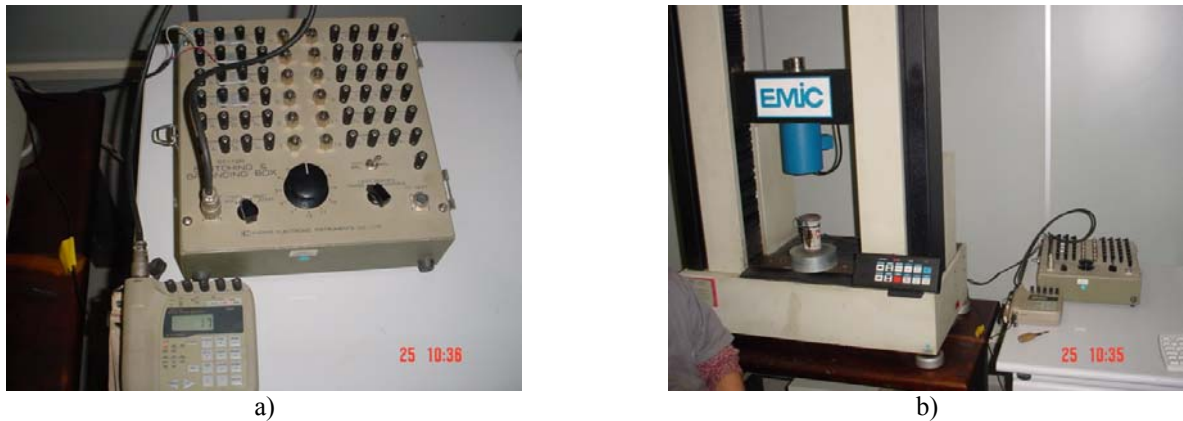
### 3.1.3.5 Ensaio de módulo de elasticidade - NBR 8522/84

Realizou-se ensaio para determinação do Módulo de Deformação Estática (Módulo Secante – Plano III – NBR 8522/84), com 08 corpos-de-prova provenientes da instalação dos extensômetros na barragem, sendo ensaiados 02 corpos-de-prova de cada furo executado na galeria de inspeção.

Para realização do ensaio, observaram-se alguns cuidados com os corpos-de-prova para evitar os erros durante a execução do ensaio. Primeiramente, lixou-se a superfície lateral dos corpos-de-prova para que ficasse plana e lisa para colagem do strain gage. Depois de lixadas e limpas, aplicou-se neles adesivo estrutural, fluído à base de resina epóxi (Figura 41), para corrigir as imperfeições na superfície e servir de base para colagem definitiva dos strain gages. Foram colados 02 em cada corpo-de-prova. As extremidades dos strain gages foram soldadas em um cabo especial para ligação à ponte de leitura (Figura 42.a). Utilizou-se prensa com capacidade de 10 tf para realização do ensaio (Figura 43.b).



**Figura 41. Colagem do strain gage com adesivo estrutural.**



**Figura 42. a) Ponte de leitura. b) Prensa de 10 tf com cp ligado à ponte.**

Os valores obtidos no ensaio através da leitora digital foram transportados à planilha especial do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME/UFPR), para obtenção dos resultados e gráficos do Módulo de Deformação Secante.

### **3.1.4 Análise comparativa entre o ensaio de reatividade potencial realizado com barras (ASTM C-1260/01) e o método de reatividade realizado com corpos-de-prova cilíndricos.**

Realizou-se o ensaio de expansão, segundo o método acelerado de acordo com a ASTM C-1260, com a finalidade de validar o ensaio de imersão descrito em 3.1.3.1, por intermédio de comparação entre amostras submetidas aos dois métodos.

Foram realizados dois tipos de comparações: primeiro, provocou-se uma reação álcali-sílica, utilizando como agregado reativo o vidro pyrex; segundo, provocou-se uma reação álcali-silicato, utilizando como agregado uma areia natural, apresentando forte extinção ondulante em análise petrográfica. Em ambos os casos, utilizou-se o cimento Portland CP V ARI com resistência a sulfatos.

Os limites de expansão segundo a ASTM C-1260 são os seguintes:

- Expansões médias menores que 0,1% aos 16 dias indicam um comportamento **inócuo** na maioria dos casos.
- Expansões médias superiores a 0,2% aos 16 dias indicam expansão **potencialmente deletéria**.

- Expansões médias situadas entre 0,1 e 0,2% aos 16 dias indicam possibilidade do agregado possuir comportamento **tanto inócuo como deletério**.

Segundo a norma ASTM C-1260, o 16º dia apresenta as leituras de referência para determinação da expansão. Recomenda-se, porém, que as leituras estendam-se até o 28º dia, para que se tenha maior precisão no comportamento do agregado. Este caso é particularmente empregado para reações do tipo álcali-silicato, por ocorrerem de forma mais lenta (VALDUGA, 2002).

## **4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo são demonstrados os resultados do ensaio de reatividade potencial, compressão axial, módulo de elasticidade, análise de microscopia eletrônica de varredura e petrografia, apresentando uma análise e discussão dos dados obtidos.

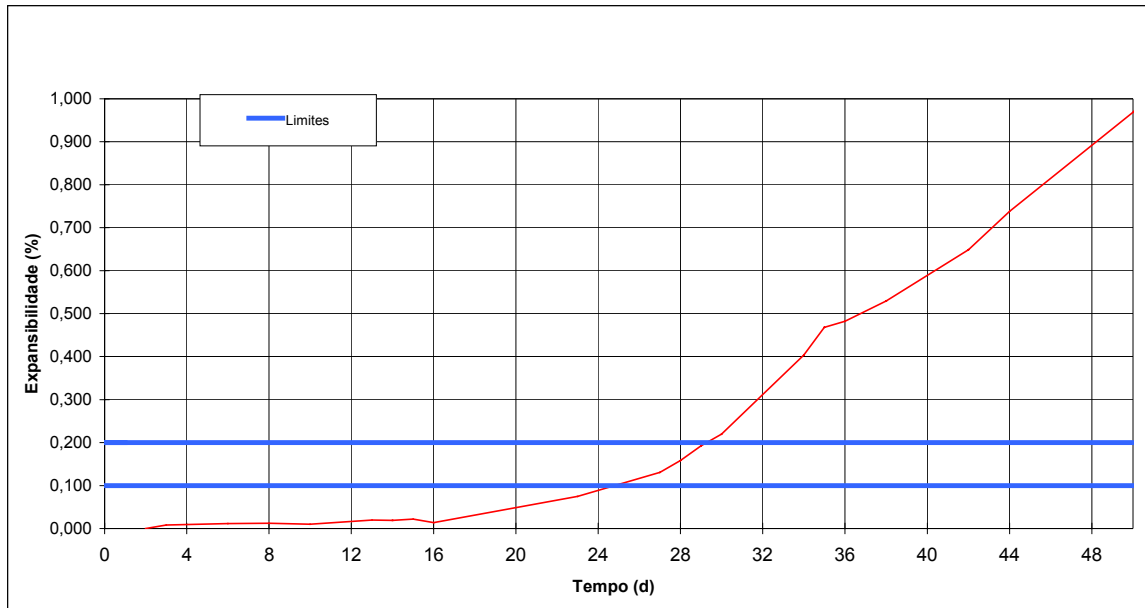
### **4.1 Comparação entre o ensaio de reatividade potencial realizado com barras (ASTM C-1260/01) e o método de reatividade realizada com corpos-de-prova cilíndricos.**

Apresentar-se-ão os resultados dos ensaios comparativos entre o método acelerado (ASTM 1260/01), realizado com barras de argamassa com dimensões de 2,54 cm x 2,54 cm x 28,5 cm e o método descrito em 3.1.3.1 com corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 5 cm x 10 cm.

#### **4.1.1 Comparação 01 (vidro Pyrex)**

Na primeira comparação, visando-se a produzir uma reação do tipo álcali-sílica, utilizou-se como agregado o vidro pyrex com cimento Portland CP ARI RS.

Um dos ensaios foi realizado segundo a ASTM C-1260/01, Ensaio de Reatividade Potencial e apresentou as seguintes expansões observadas no gráfico de Expansibilidade x Tempo (Figura 43).



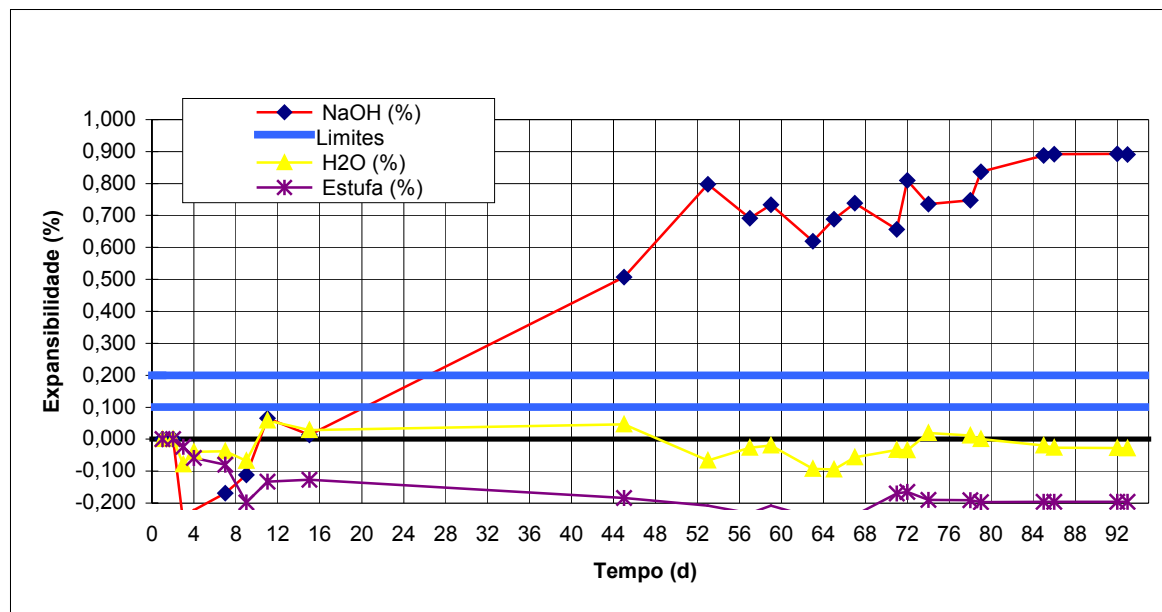
**Figura 43. Gráfico de Expansibilidade x Tempo (ASTM C-1260/01) – vidro pyrex.**

Nota-se que após o 16º dia as expansões obtiveram um rápido acréscimo nos valores. No final do ensaio, os corpos-de-prova moldados apresentavam-se parcialmente destruídos devido às expansões que, na média das três barras, atingiram 0,969% aos 50 dias.

O segundo ensaio, executado com os mesmos materiais (vidro pyrex e cimento Portland CP V ARI RS), foi realizado em corpos-de-prova cilíndricos (5 cm x 10 cm), assemelhando-se aos corpos-de-prova extraídos da barragem. O volume dos corpos cilíndricos é aproximadamente igual ao volume das barras da ASTM C-1260.

Os corpos-de-prova moldados foram imersos em solução de NaOH, água deionizada e estufa, todos a 80°C. As leituras foram realizadas com micrômetro digital (precisão de três casas decimais) em suporte especial para que fossem sempre realizadas no mesmo ponto do corpo-de-prova. As expansões dos corpos-de-prova em função do tempo estão apresentadas na Figura 44.





**Figura 44. Gráfico de Expansibilidade x Tempo. (corpos-de-prova imersos em solução de NaOH, água e estufa)**

Percebe-se que as expansões ocorridas com os corpos-de-prova imersos em solução de NaOH são muito similares às que ocorreram com o ensaio a ASTM C-1260/01. A partir do 16º dia as expansões do corpo-de-prova em solução de NaOH obtiveram valores em ascensão, chegando ao 53º dia com 0,797% de expansão. Comparando ao ensaio da ASTM C-1260 de 0,969% aos 50 dias, verifica-se que as expansões médias ocorridas com as barras foram superiores em 21,6% em relação à expansão ocorrida com os corpos-de-prova cilíndricos.

As expansões nos corpos-de-prova imersos em água não apresentaram valores significantes, que permaneceram com os mesmos comprimentos iniciais. Já os corpos-de-prova colocados em estufa, a 80°C, apresentaram retração (expansões negativas) e isso se deve ao fato da água encontrada dentro do concreto ter evaporado.

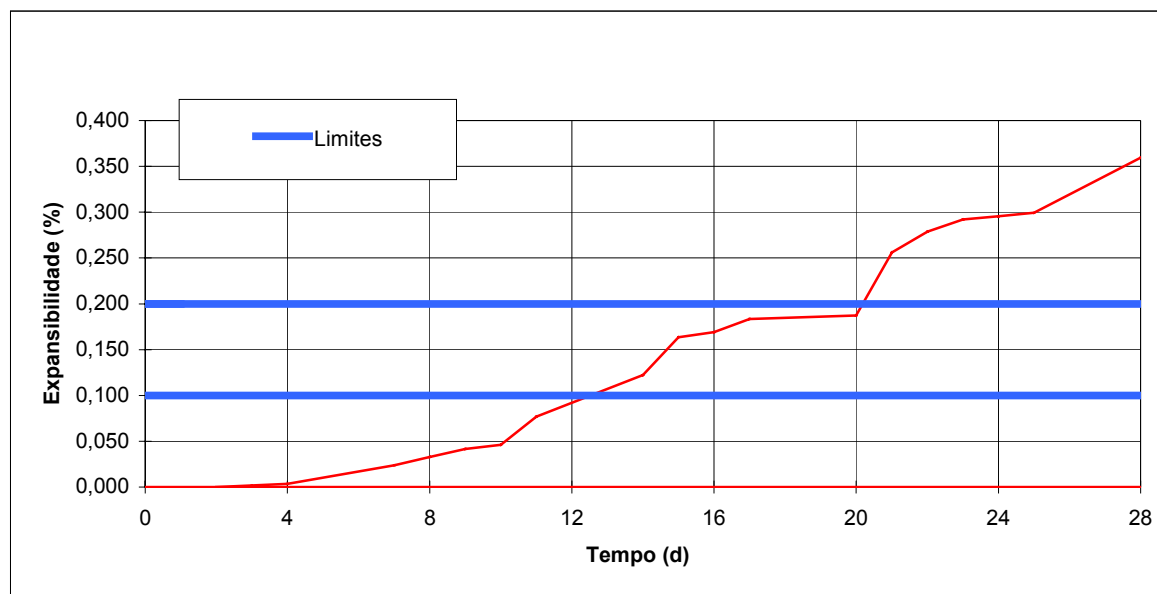


#### 4.1.2 Comparação 02 (areia reativa)

Com o intuito de simular uma reação do tipo álcali-silicato, utilizou-se um agregado miúdo, apresentando grãos de quartzo com forte extinção ondulante, e cimento Portland com alto teor de álcalis (CP V ARI RS)

A comparação 02 seguiu os mesmos passos da comparação 01, moldando-se barras de argamassa de 2,54 cm x 2,54 cm x 28,5 cm para o ensaio da ASTM C-1260 e corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 5 cm x 10 cm para o ensaio de imersão em solução de NaOH a 1N, água e estufa, todos a 80°C.

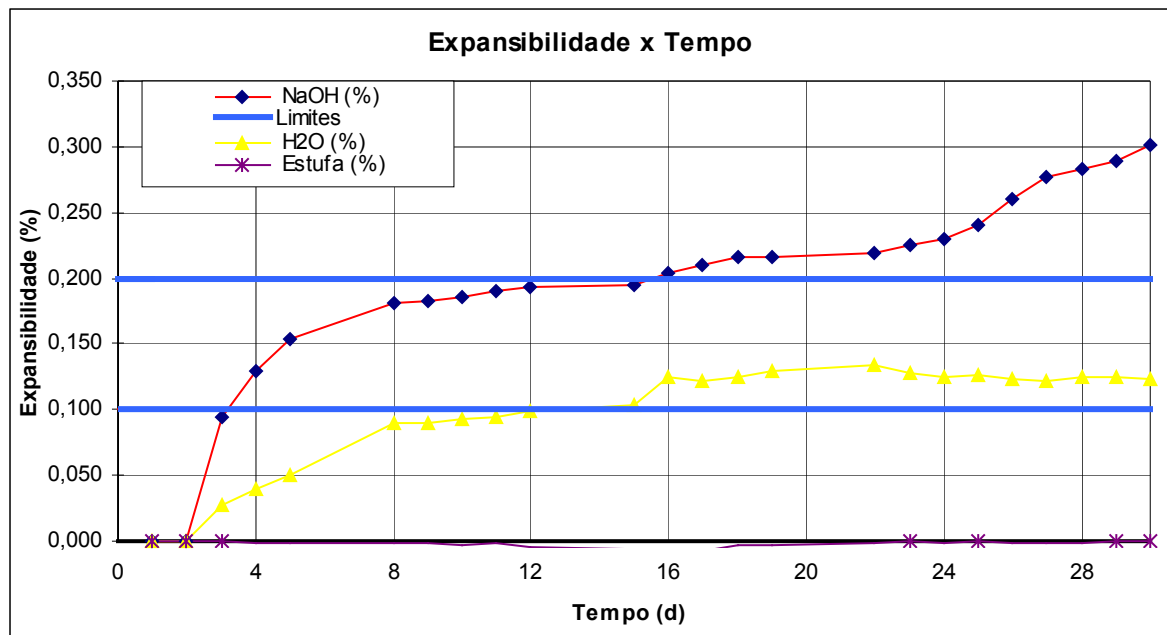
Os resultados para o ensaio realizado de acordo com a ASTM C-1260 estão apresentados no gráfico da Figura 45.



**Figura 45. Gráfico de expansão x tempo, média das 3 barras de argamassa realizadas com areia reativa e cimento Portland (CP V ARI RS).**

Analisando o gráfico, nota-se a ocorrência de expansão deletéria, pois aos 16 dias a expansão média era de 0,169% e aos 28 de 0,359%.

A Figura 46 apresenta o gráfico com as curvas de expansão em relação ao tempo dos corpos-de-prova imersos em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.

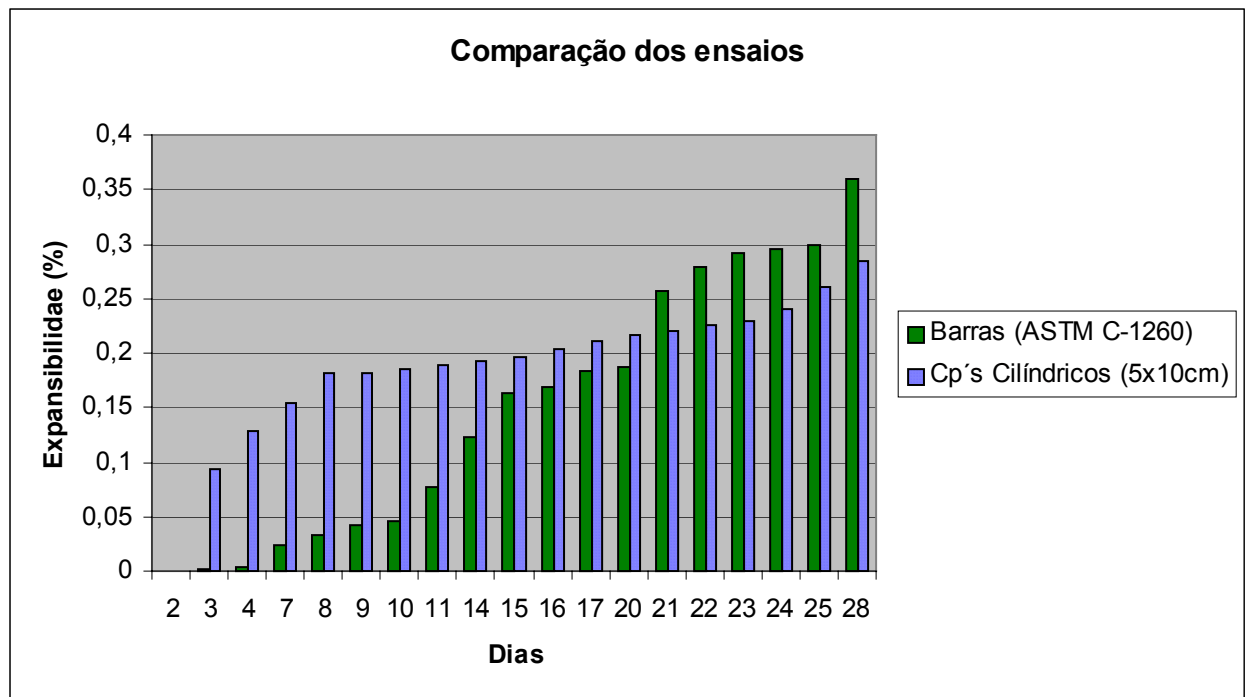


**Figura 46. Gráfico de Expansibilidade x Tempo (corpos-de-prova imersos em solução de NaOH, água e estufa).**

Analisando o gráfico, pode-se notar que as expansões em meio de solução de NaOH, por ser uma reação do tipo álcali-silicato com corpos cilíndricos, obtiveram valores iniciais superiores até o 20º dia, chegando ao 28º dia com um valor de 0,284%, enquanto pelo ensaio com as barras, a expansão média no 28º dia foi de 0,359%, o que corresponde a uma diferença de 26,4% acima das expansões dos corpos cilíndricos.

As expansões devidas à imersão dos corpos-de-prova em água deionizada mantiveram-se entre 0,1 e 0,2%, não caracterizando um comportamento deletério desta expansão. Os corpos-de-prova que permaneceram em estufa a 80°C não apresentaram nenhum tipo de expansão.

Através do gráfico da Figura 47, nota-se a comparação entre os ensaio realizado com as barras (ASTM C-1260) e o ensaio realizado com os corpos-de-prova cilíndricos em solução de NaOH.



**Figura 47. Comparação entre os ensaios realizados com as barras (ASTM C-1260) e o ensaios realizados com os corpos-de-prova cilíndricos em solução de NaOH.**

Com esses resultados, pôde-se concluir que os corpos-de-prova retirados da barragem para análise e estudo foram tratados em situação péssima, devido à imersão em solução de NaOH, água deionizada e estufa, todos a 80°C, possibilitando identificar reações deletérias no concreto caso existam.

Os limites de expansão adotados pela ASTM C-1260 são para argamassas com relação cimento:areia igual a 1:2,25, em barras com dimensões 2,54 cm x 2,54 cm x 28,5 cm. Devido às dimensões dos testemunhos extraídos da barragem serem maiores que as barras prismáticas bem como as dimensões do agregado, dificultam um ataque imediato. Necessita-se, portanto, de um período mais longo de exposição e observação destes corpos-de-prova (ALVES et al, 1997). Os autores afirmam que as expansões medidas em testemunhos de concretos são inferiores às medidas em argamassas.

#### **4.2 Ensaio de reatividade potencial através do método de imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH), água deionizada e estufa, todos a 80°C.**

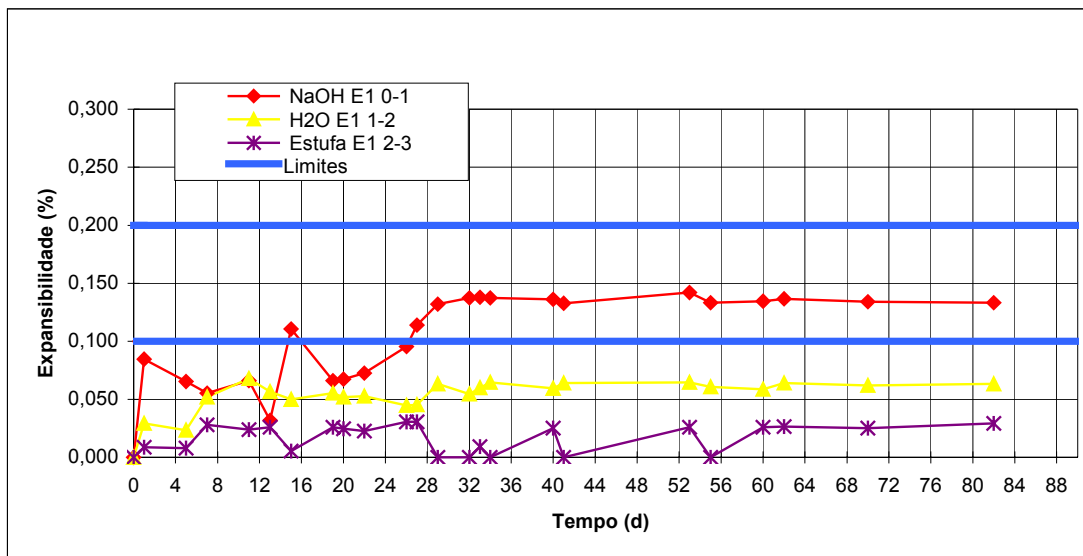
Os corpos-de-prova extraídos da galeria de drenagem da barragem, identificados com a inicial “F”, permaneceram em ensaio por 130 dias. Os corpos-de-prova extraídos da galeria de inspeção da barragem, identificados com a letra “E”, completaram 82 dias de ensaio.

Os valores obtidos no ensaio através das leituras com micrômetro digital foram transportados para planilha especial do LAME, para obtenção dos resultados e gráficos das expansões.

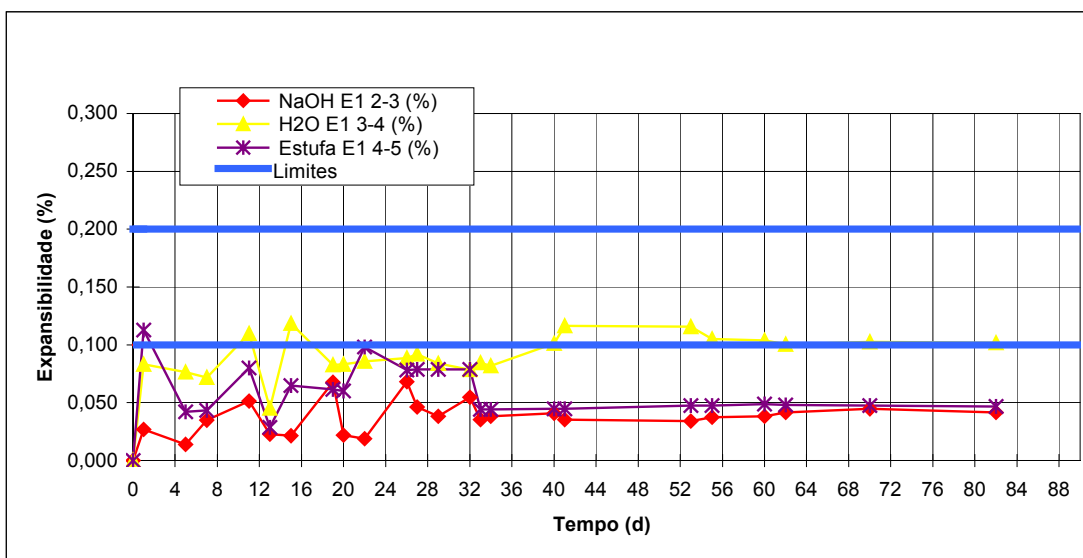
A nomenclatura dada aos testemunhos segue o seguinte exemplo: E2 2-3 c2, significa que este é um corpo-de-prova da galeria de inspeção da barragem (E) do furo 02 (2), está compreendido entre 2 e 3 metros de profundidade (2-3) e é o segundo corpo-de-prova desta profundidade (c2). A nomenclatura dada aos testemunhos, como F 01 a F 05, identifica os que foram retirados da galeria de drenagem da barragem.

Através dos gráficos obtidos, apresentados a seguir nas Figuras 48 a 58, é possível verificar a diferença entre os corpos-de-prova que obtiveram álcalis da solução de NaOH e os que deveriam reagir apenas com os álcalis remanescentes com a água como catalisador. Os corpos-de-prova em estufa representariam o valor de comparação na condição péssima (alta temperatura). Vale ressaltar que os corpos-de-prova não foram submetidos à estufa antes do início do ensaio.

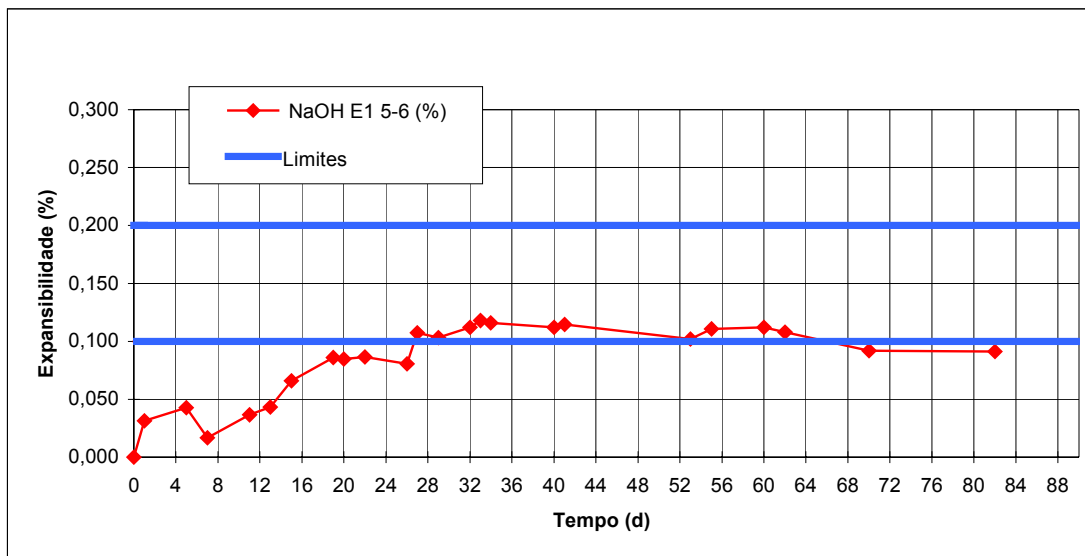
Os gráficos mostrados nas Figuras 48 a 58 apresentam as curvas de expansibilidade, com relação ao tempo, dos testemunhos retirados da galeria de inspeção da barragem, os quais permaneceram em ensaio por 82 dias.



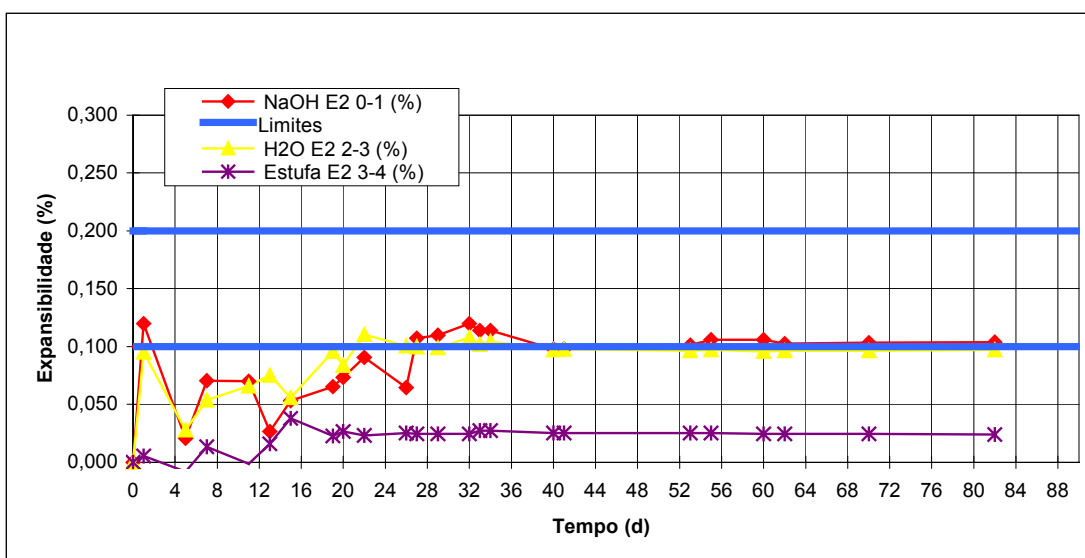
**Figura 48.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 01 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.



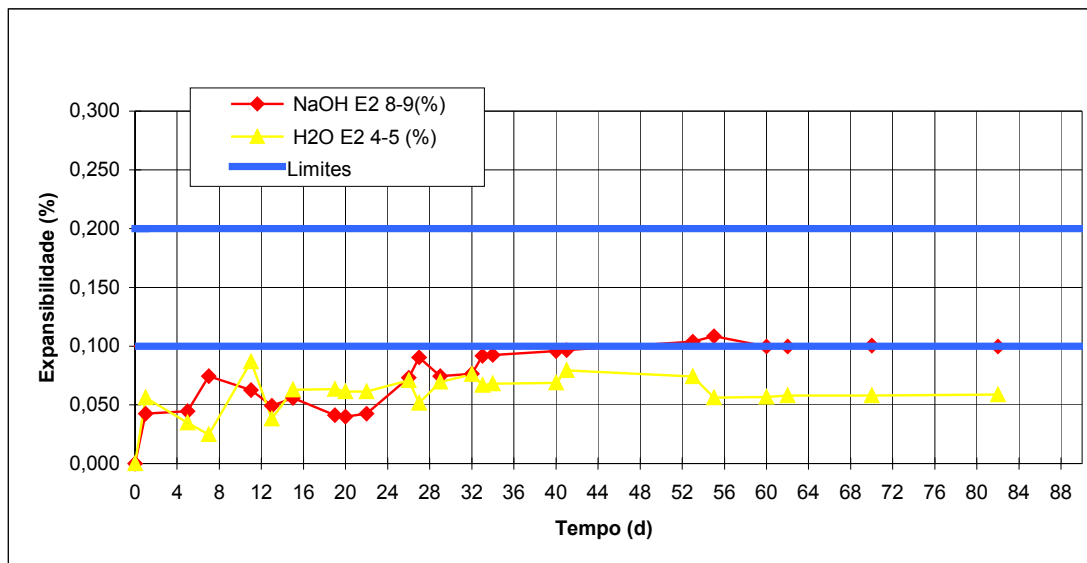
**Figura 49.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 01 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.



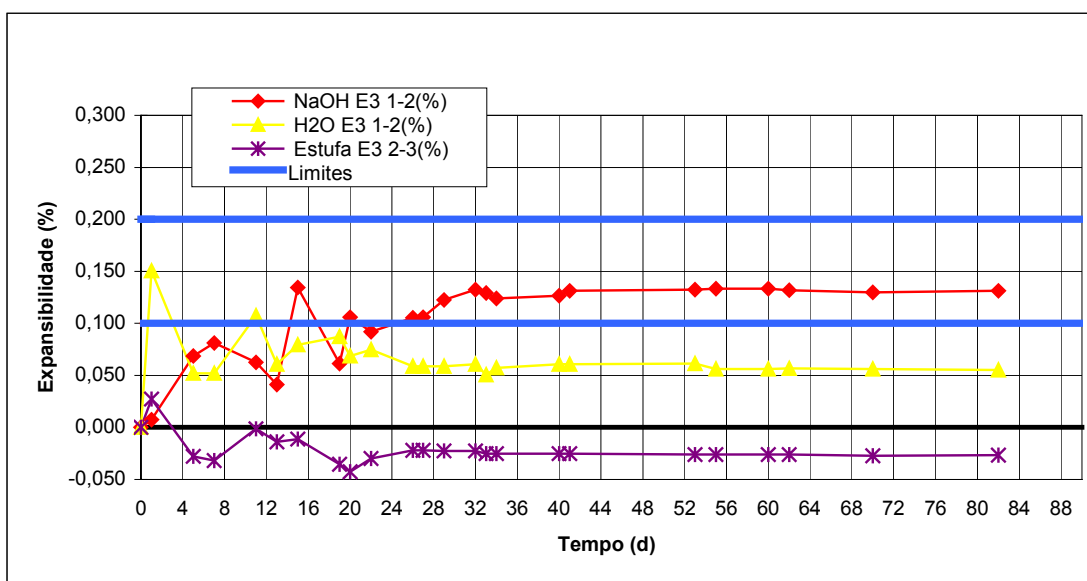
**Figura 50.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 01 da galeria de inspeção. Expansões ocorridas em solução de NaOH a 80°C.



**Figura 51.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 02 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.



**Figura 52.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 02 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.



**Figura 53.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 03 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.

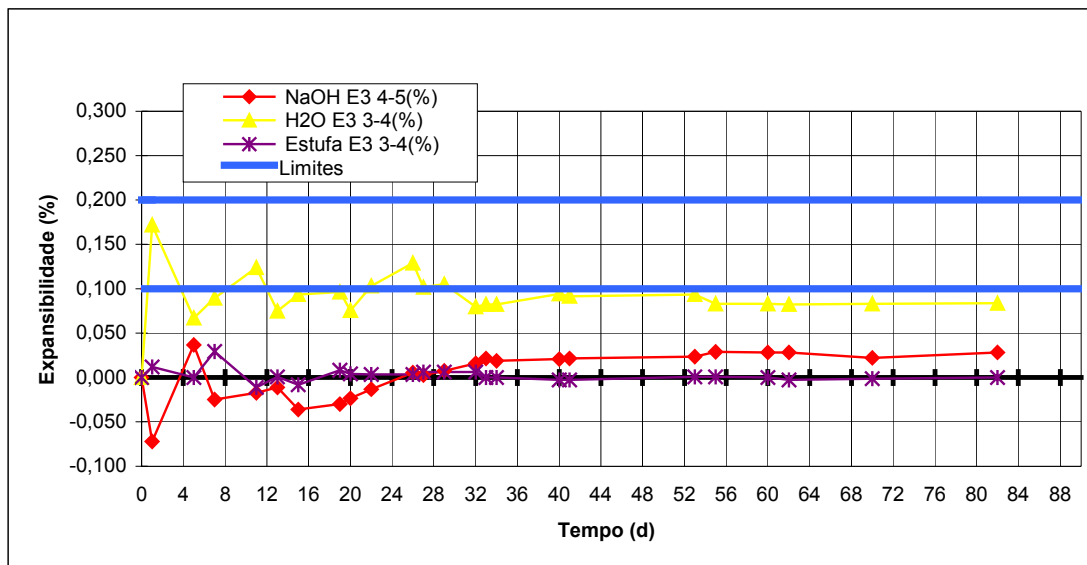


Figura 54. Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 03 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.

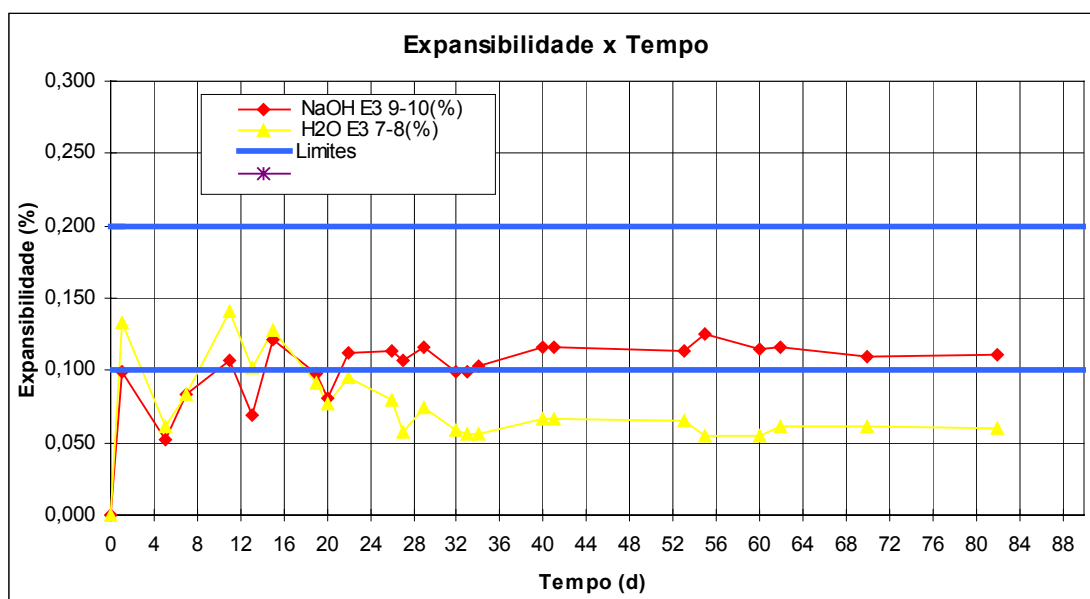
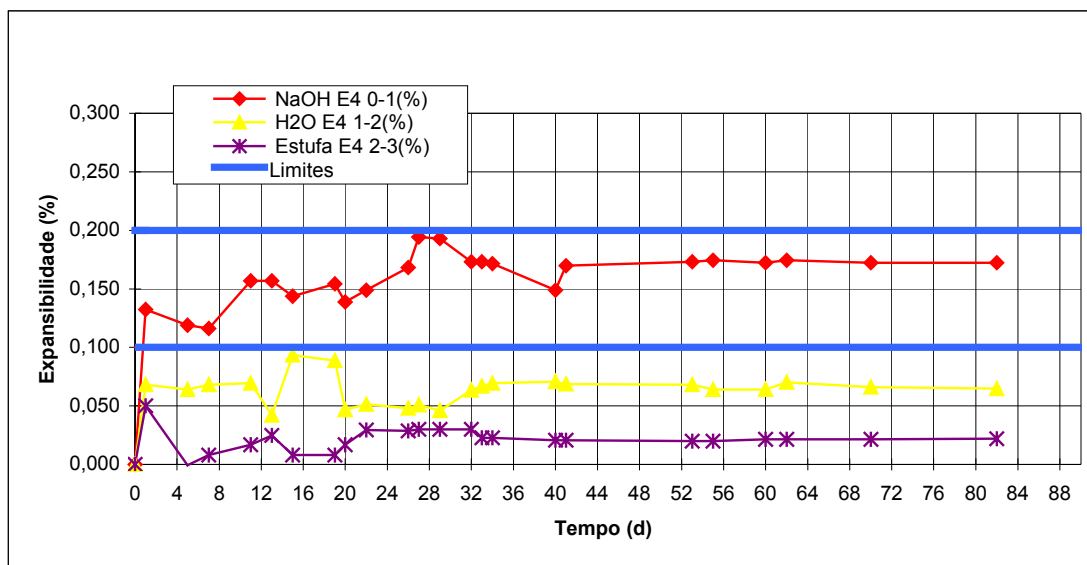
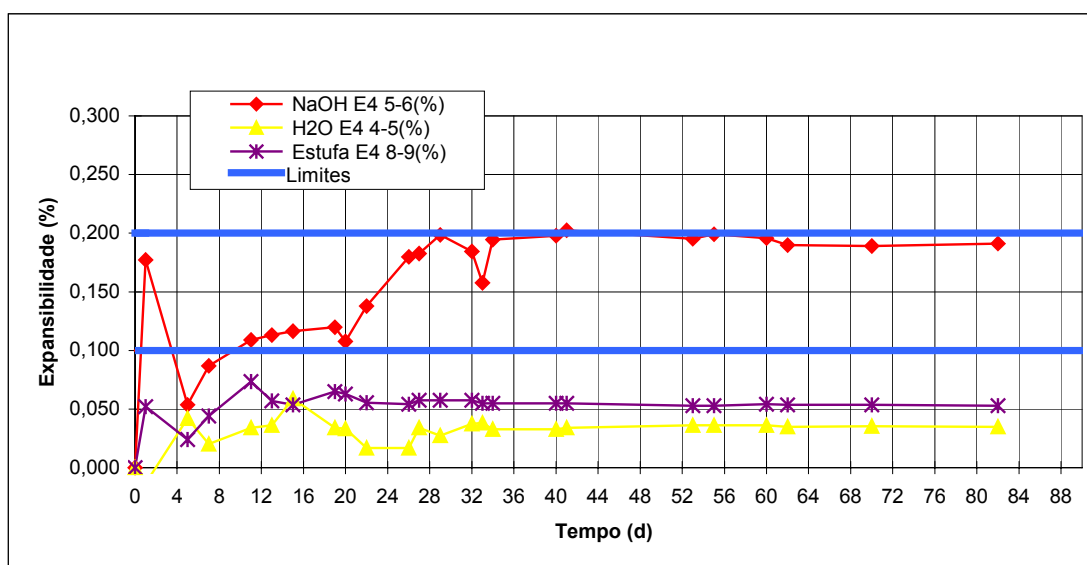


Figura 55. Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 03 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água ambos a 80°C.

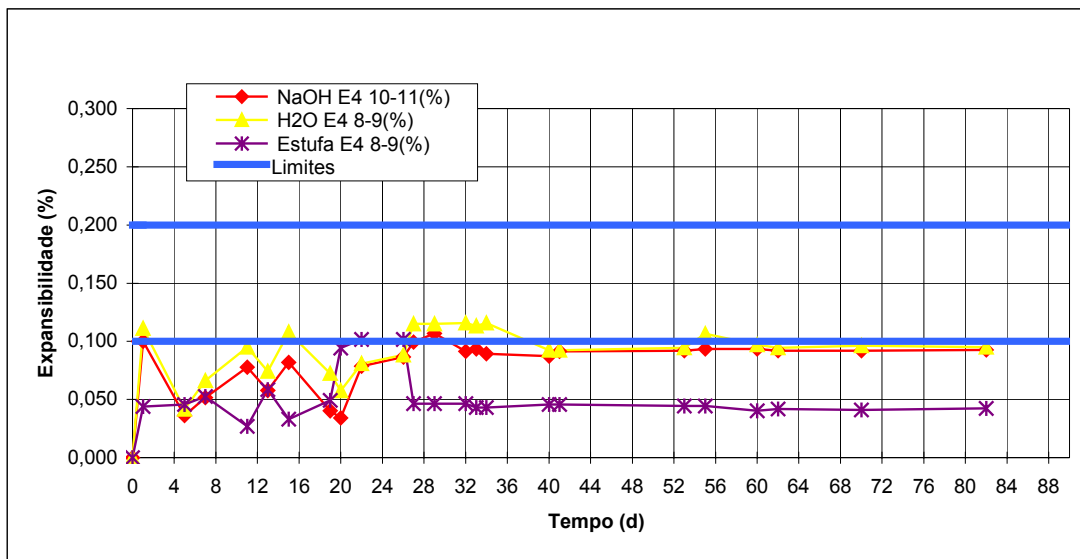




**Figura 56.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 04 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.

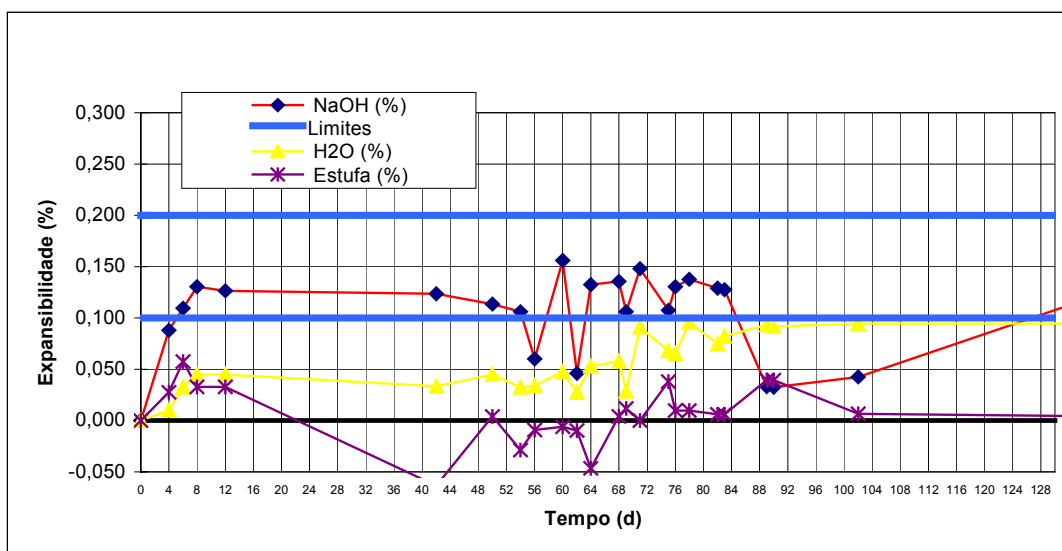


**Figura 57.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 04 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.

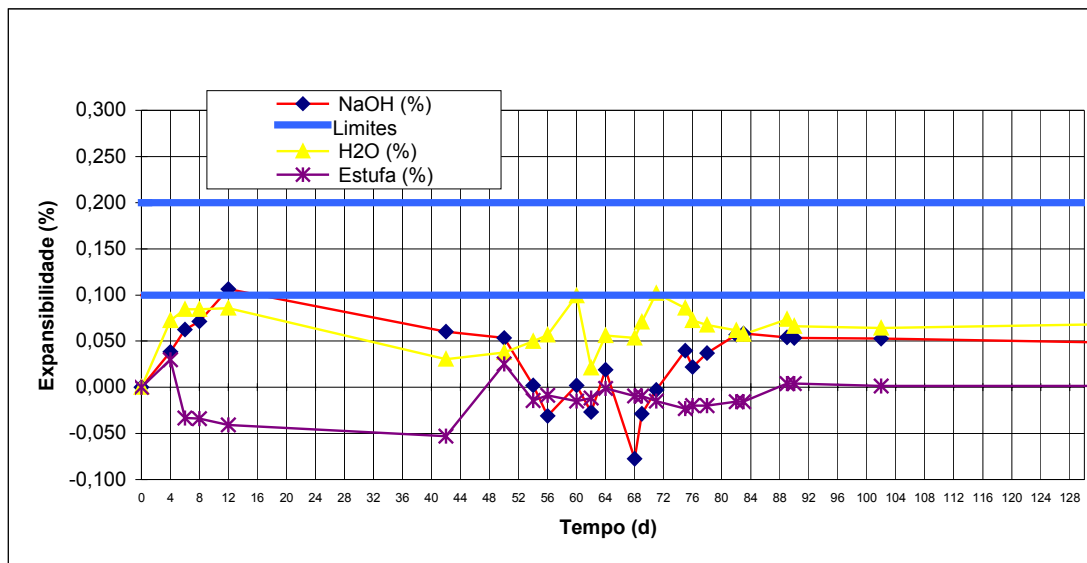


**Figura 58.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 04 da galeria de inspeção. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.

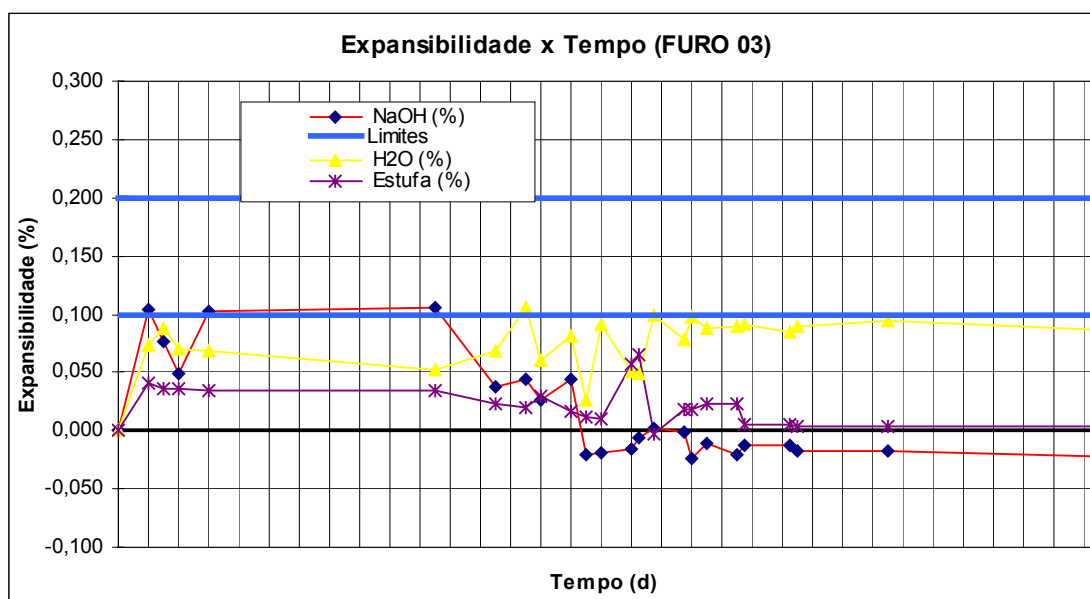
Os gráficos mostrados nas Figuras 59 a 63 apresentam as curvas de expansibilidade com relação ao tempo, dos testemunhos retirados da galeria de drenagem da barragem, os quais permaneceram em ensaio por 130 dias.



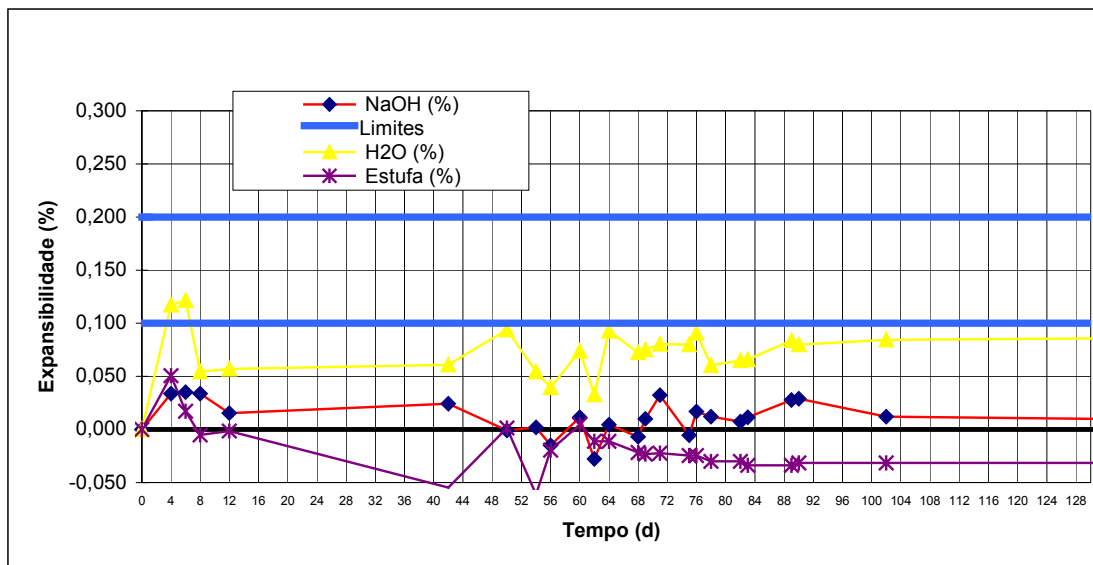
**Figura 59.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 01 da galeria de drenagem. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.



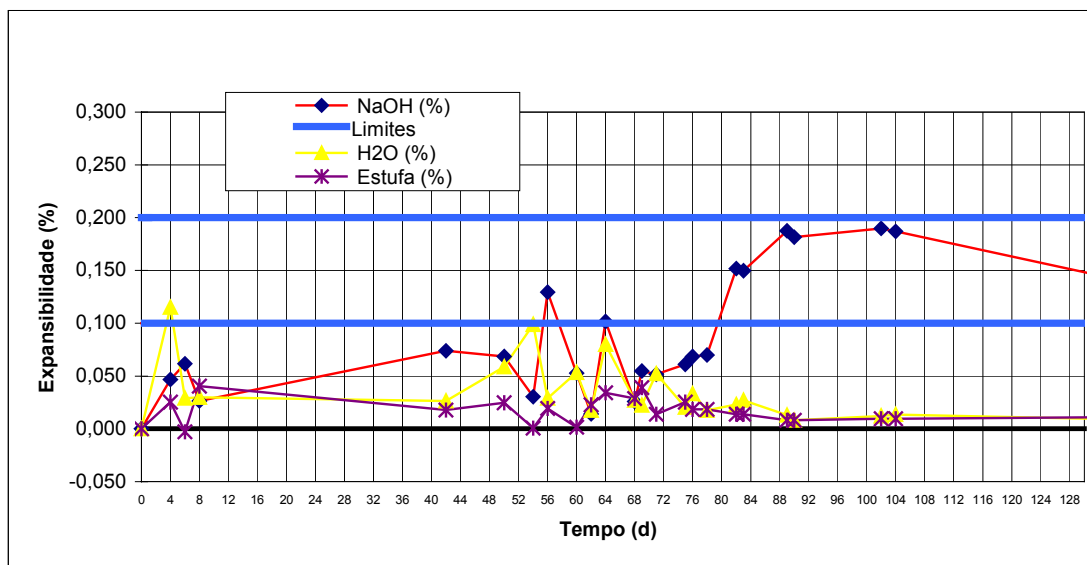
**Figura 60.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 02 da galeria de drenagem. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.



**Figura 61.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 03 da galeria de drenagem. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.



**Figura 62.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 04 da galeria de drenagem. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.



**Figura 63.** Gráfico de expansão (%) x tempo (dias) dos corpos-de-prova extraídos do furo 05 da galeria de drenagem. Comparação das expansões ocorridas em solução de NaOH, água e estufa, todos a 80°C.

Através da análise destes gráficos, nota-se que, dos 16 corpos-de-prova imersos em solução de NaOH a 1N, apenas 7 corpos-de-prova (43,7%) apresentaram expansões entre 0,1 a 0,2%; os outros 9 corpos-de-prova (56,3%) apresentaram expansões inferiores a 0,1%. Isto se deve ao fato dos corpos-de-prova não apresentarem material deletério suficiente para que ultrapassem os 2% de expansão.

Com relação aos 15 corpos-de-prova imersos em água a 80°C, e aos 13 corpos-de-prova colocados em estufa também a 80°C, todos obtiveram expansões inferiores a 0,1%.

Em alguns casos com corpos-de-prova colocados em estufa, ocorreram expansões negativas, ou seja, o corpo-de-prova apresentou retração, como é o caso do corpo-de-prova E32-3.

### 4.3 Ensaio de resistência à compressão axial - NBR 5739/94

Os resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão axial estão apresentados na tabela 07.

**Tabela 7 - Tensões de ruptura obtidas.**

| Corpo-de-prova | Registro   | Diâmetro do CP (mm) | Seção do CP (mm <sup>2</sup> ) | Força (kgf) | Tensão ruptura (MPa) |
|----------------|------------|---------------------|--------------------------------|-------------|----------------------|
| CP1            | E1 1-2 c2  | 55                  | 2375,83                        | 6761        | 27,9                 |
| CP2            | E1 7-8     | 55                  | 2341,40                        | 6008        | 25,2                 |
| CP3            | E2 0-2 c1  | 53                  | 2206,18                        | 6616        | 29,4                 |
| CP4            | E2 2-3 c2  | 54                  | 2290,22                        | 5545        | 23,7                 |
| CP5            | E3 0-1     | 54                  | 2290,22                        | 6810        | 29,2                 |
| CP6            | E3 2-3 c1  | 54                  | 2290,22                        | 6294        | 27,0                 |
| CP7            | E4 0-1     | 54                  | 2290,22                        | 5069        | 21,7                 |
| CP8            | E4 1-2 c1  | 55                  | 2375,83                        | 7673        | 31,7                 |
| CP9            | E4 3-4 c1  | 54                  | 2290,22                        | 4954        | 21,2                 |
| CP10           | E4 3-4 c2  | 54                  | 2290,22                        | 4831        | 20,7                 |
| CP11           | E4 3-4 c3  | 54                  | 2290,22                        | 8616        | 36,9                 |
| CP12           | E4 4-5 c2  | 54                  | 2290,22                        | 5963        | 25,5                 |
| CP13           | E4 4-5 c3  | 54                  | 2290,22                        | 5192        | 22,2                 |
| CP14           | E4 5-6 c3  | 54                  | 2290,22                        | 6403        | 27,4                 |
| CP15           | E4 5-6 c2  | 54                  | 2290,22                        | 6315        | 27,0                 |
| CP16           | E4 6-7 c1  | 54                  | 2290,22                        | 5324        | 22,8                 |
| CP17           | E4 6-7 c3  | 54                  | 2290,22                        | 5769        | 24,7                 |
| CP18           | E4 9-10 c1 | 54                  | 2290,22                        | 6359        | 27,2                 |

Os valores de tensão máxima variaram entre 20,7 MPa a 36,9 MPa resultando uma média entre os 18 corpos-de-prova de 26,2 MPa. Por se tratar de concreto massa para. O gráfico da Figura 64 representa as variações nos valores obtidos.

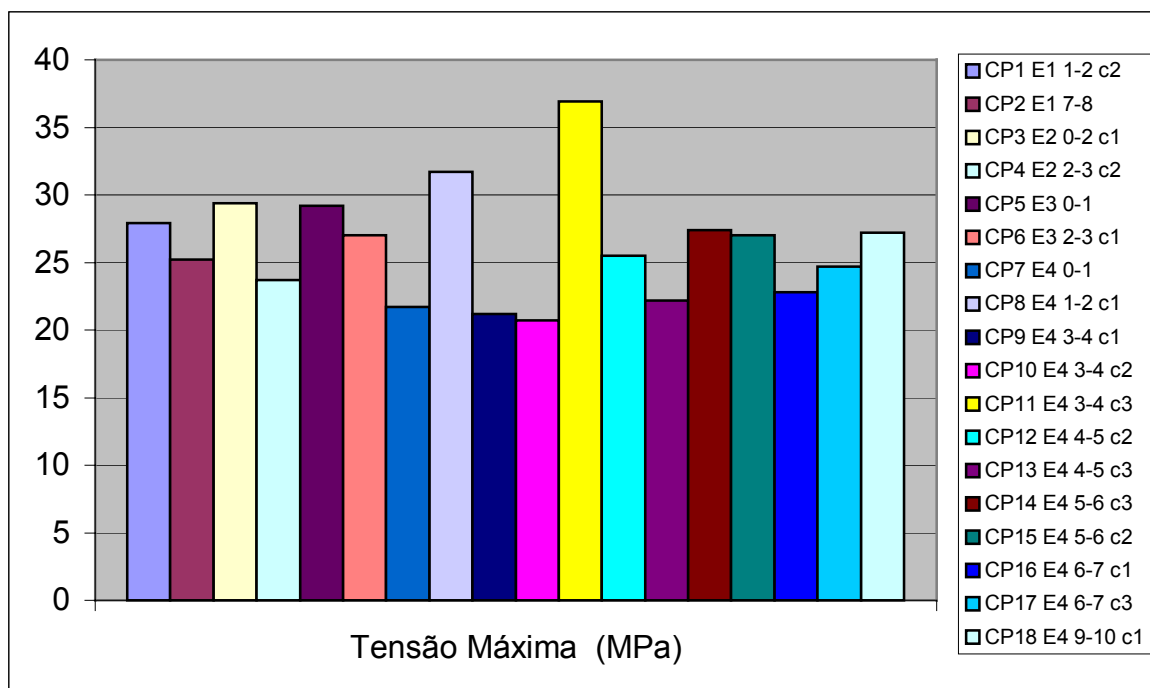
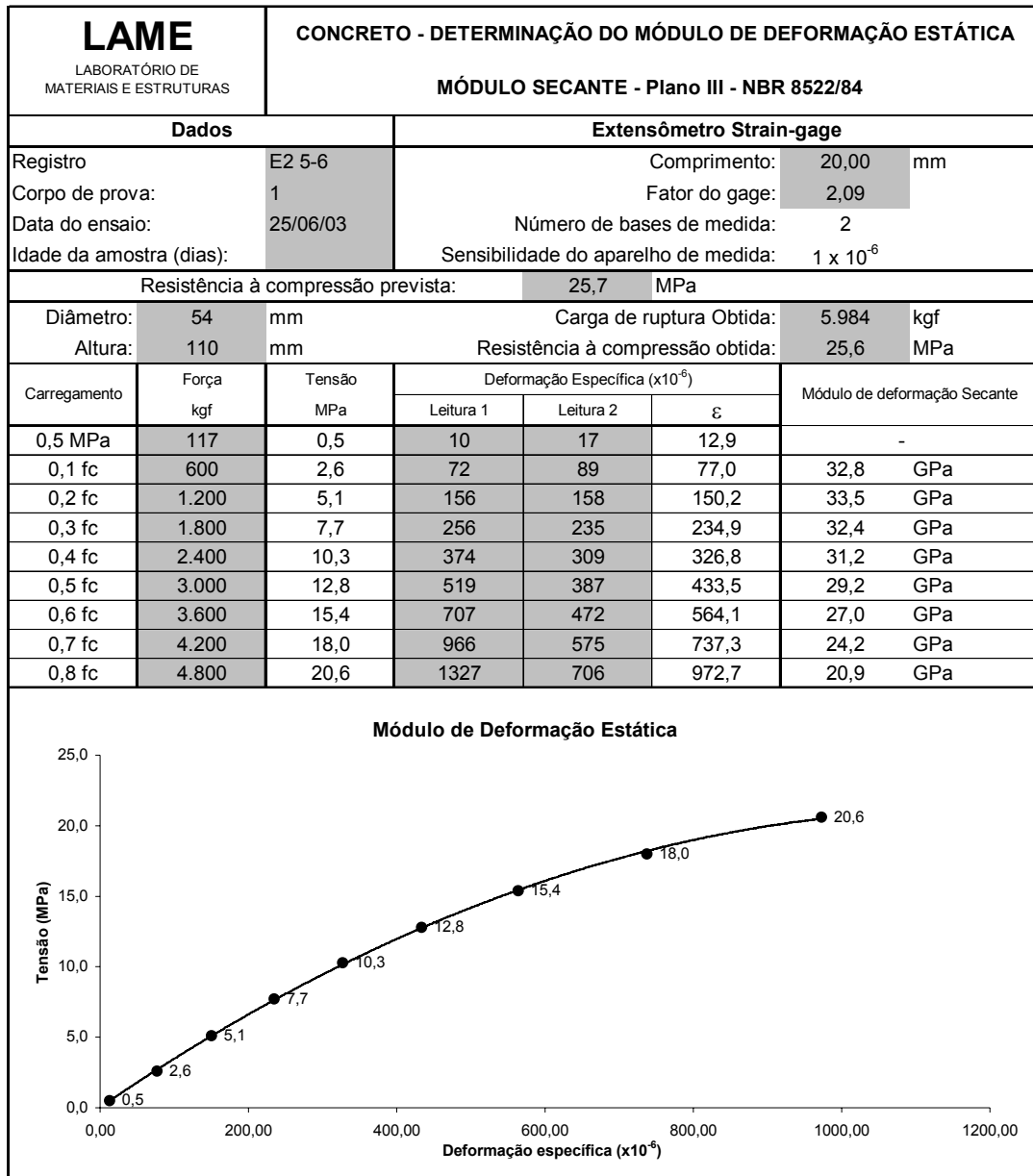


Figura 64. Tensões máximas obtidas.

#### 4.4 Ensaio de módulo de elasticidade - NBR 8522/84

Os valores obtidos com o ensaio de módulo de elasticidade dos oito corpos-de-prova foram transportados para uma planilha especial do LAME (Figura 65), obtendo-se os valores para o módulo de deformação secante.



**Figura 65. Planilha LAME para o cálculo do módulo de deformação secante.**

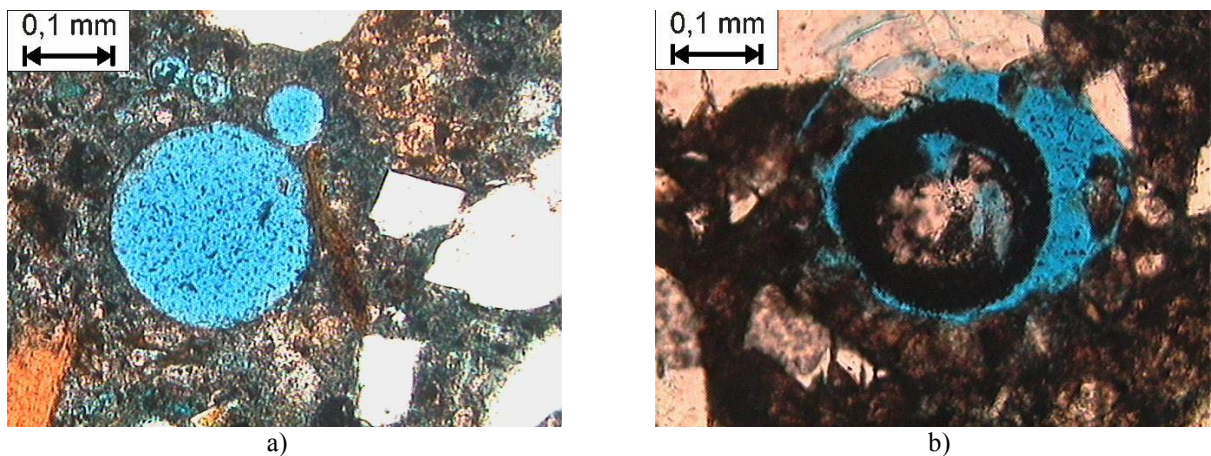
Com os resultados dos oito corpos-de-prova, calculou-se a média dos valores do módulo de deformação secante igual a 25 GPa, para o carregamento de  $0,4 \times f_c$  (40% da resistência à compressão prevista). Verificou-se que o concreto da UHE Mascarenhas apresenta módulo de elasticidade compatível com concretos executados no mesmo período e com as mesmas características.

#### 4.5 Análise Petrográfica

Serão apresentadas, a seguir, as análises petrográficas das amostras submetidas ao Microscópio Óptico de Luz Transmitida, realizados no LAMIR da UFPR, no qual foram observadas as bordas dos agregados e os poros e vazios da argamassa, visando à identificação de gel ou produtos cristalizados decorrentes da reação álcali-agregado, além das características gerais dos agregados que denotam reatividade (VIEIRA & OLIVEIRA, 1997).

De acordo com VIEIRA (1997), o gel expansivo apresenta-se como um material incolor, porém, em função da resina utilizada e de sua porosidade, pode apresentar-se azulado, distribuindo-se preferencialmente na zona de interface agregado/argamassa, nas microfissuras dos agregados e argamassa e em poros do concreto.

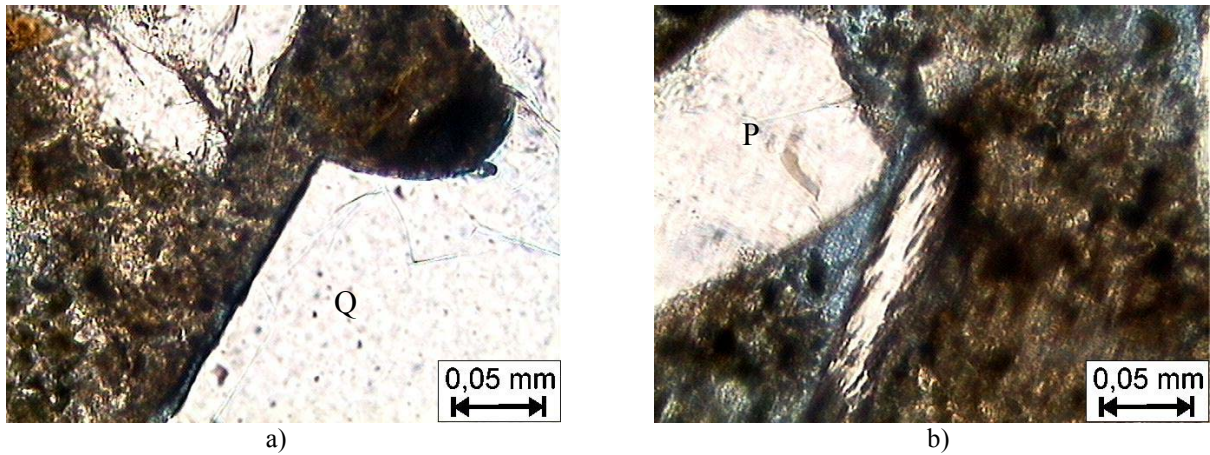
A Figura 66 apresenta a microscopia óptica de luz transmitida referente à amostra do corpo-de-prova E2 0-1 F.E., ou seja, extraída do furo 2 da galeria de inspeção da barragem, a qual não foi submetida ao ensaio de reatividade.



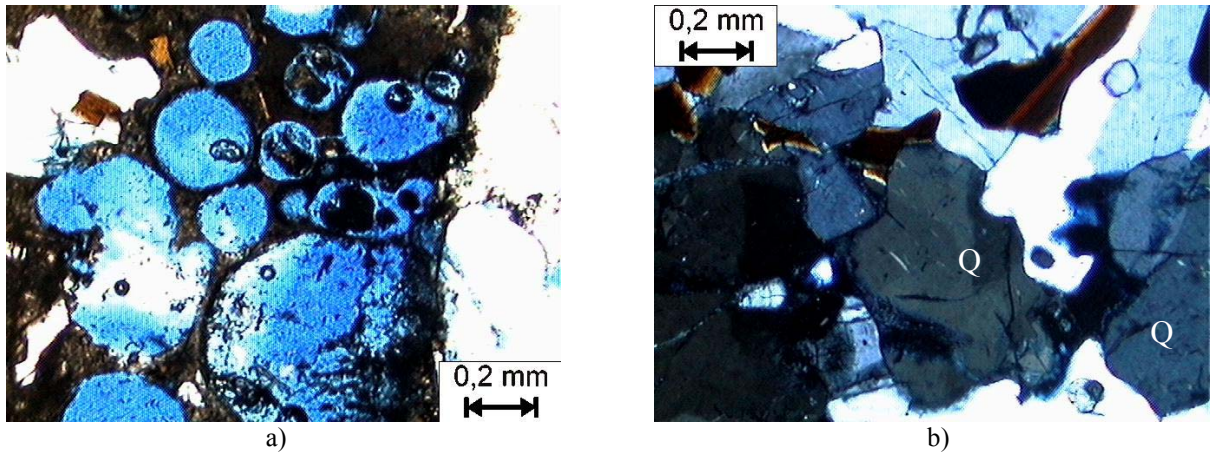
**Figura 66. Microscópio óptico de luz transmitida, aumento de 100x. a) Poros preenchidos com gel, em cor azulada devido à resina utilizada para preparação da lâmina. b) Gel encontrado na interface agregado/argamassa e nas microfissuras do agregado.**

As Figuras 67 e 68 apresentam a microscopia óptica de luz transmitida referente à amostra do corpo-de-prova E3 9-10 NaOH, ou seja, extraída do furo 3 da galeria de inspeção da casa de força da UHE, que permaneceu em ensaio de reatividade em solução de NaOH.





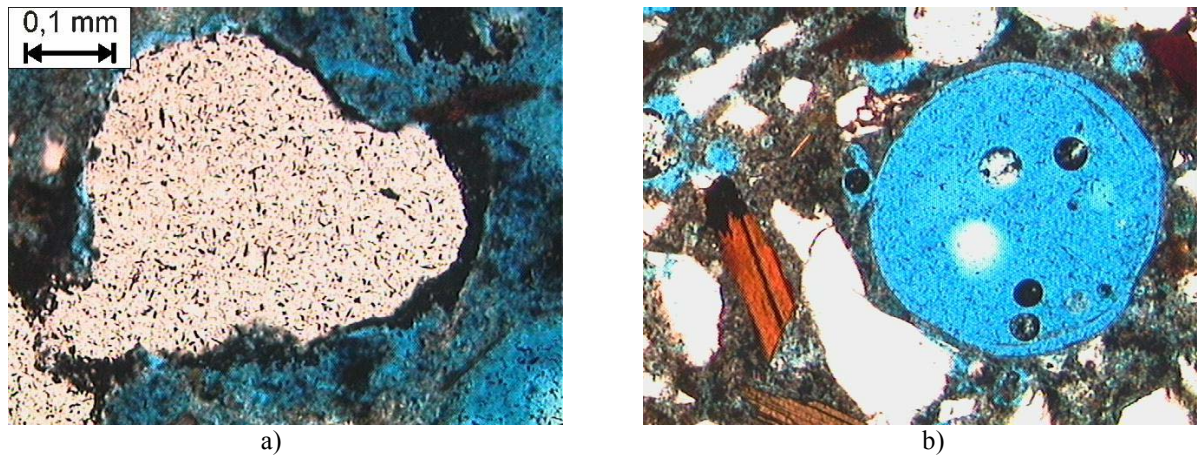
**Figura 67. a) Borda de RAA junto ao agregado (Quartzo -Q), aumento 200x. b) Borda de RAA junto ao agregado (Plagioclásio - P), aumento 200x.**



**Figura 68. Microscópio óptico de luz transmitida, aumento de 40x. a) Poros preenchidos com gel, em cor azulada devido à resina utilizada para preparação da lâmina. b) Quartzo (Q) apresentando forte extinção ondulante.**

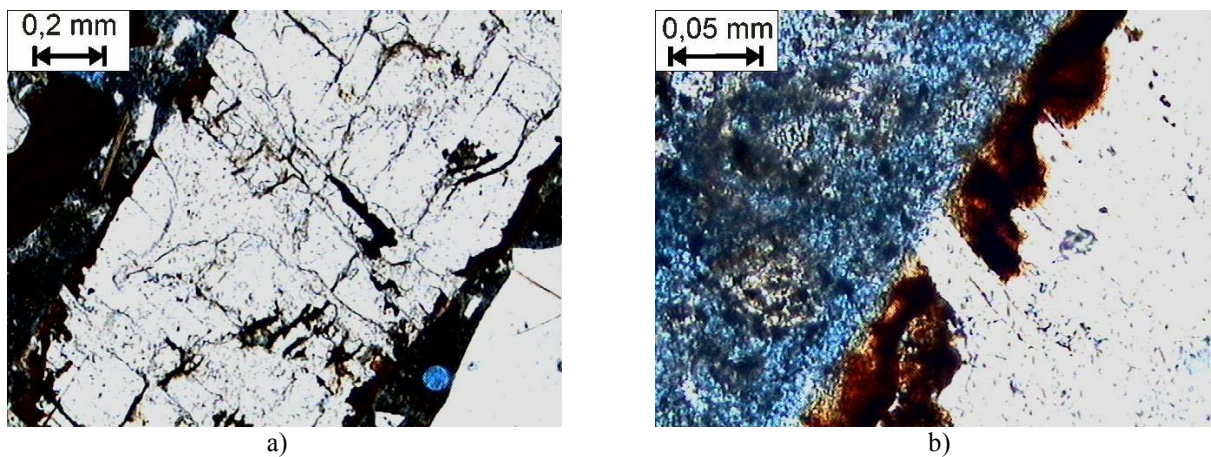
A Figura 69 apresenta a microscopia óptica de luz transmitida referente à amostra do corpo-de-prova E2 2-3 H<sub>2</sub>O, ou seja, extraída do furo 2 da galeria de inspeção da barragem, que permaneceu em ensaio de reatividade em água deionizada.



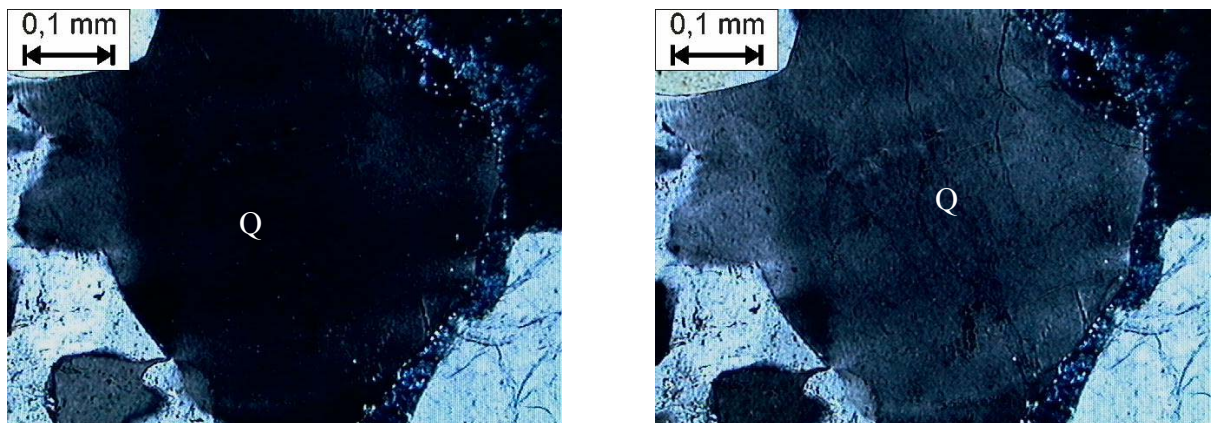


**Figura 69. a) Anel de RAA ao redor do agregado. b) Poros preenchidos com gel.**

As Figuras 70 a 72 apresentam a microscopia óptica de luz transmitida referente à amostra do corpo-de-prova E3 9-10 F.E., ou seja, extraída do furo 3 da galeria de inspeção da barragem, sem ser submetida à análise pelo ensaio de reatividade.

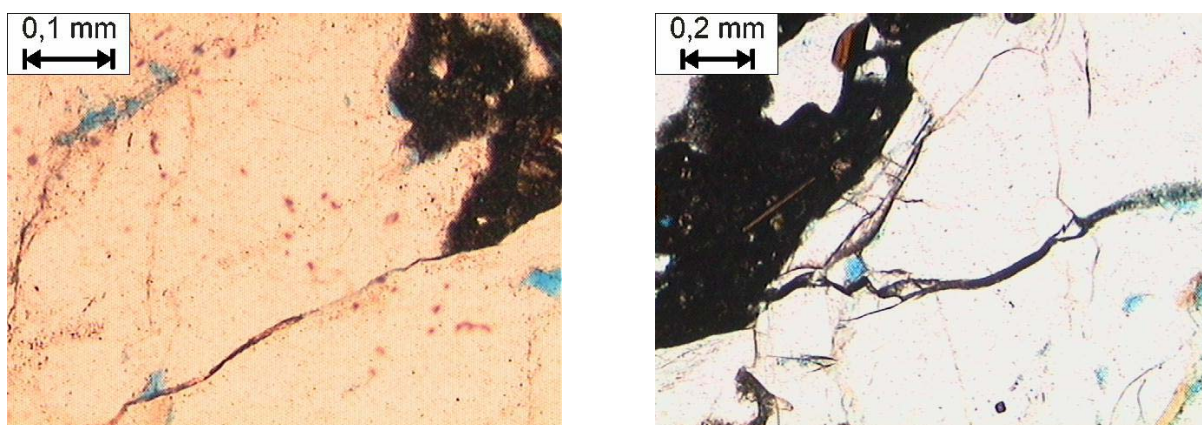


**Figura 70. a) Agregado (Calcita) com produto da reação na borda e nas fissuras, aumento de 40x. b) Detalhe da borda com RAA, aumento de 200x.**



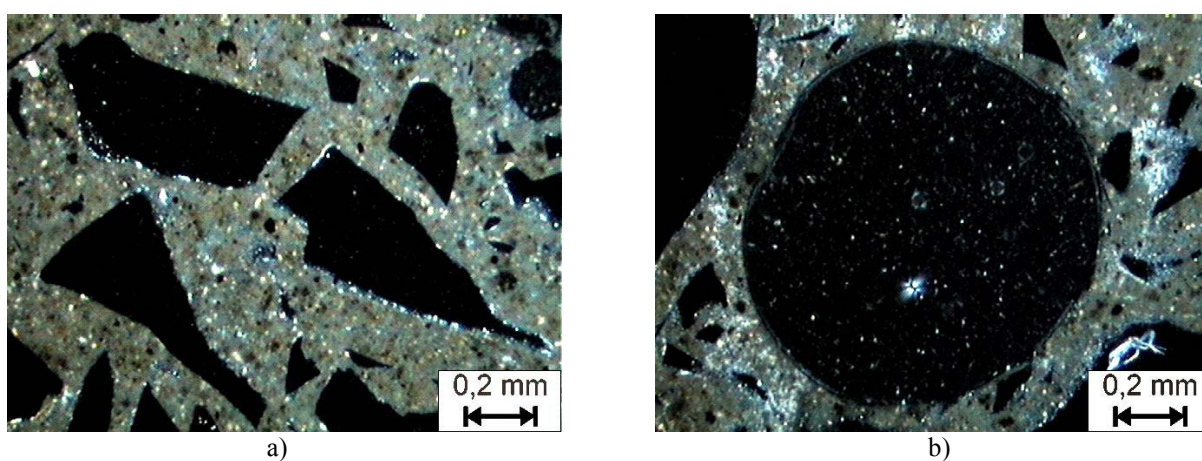
**Figura 71. Quartzo (Q) apresentando forte extinção ondulante.**



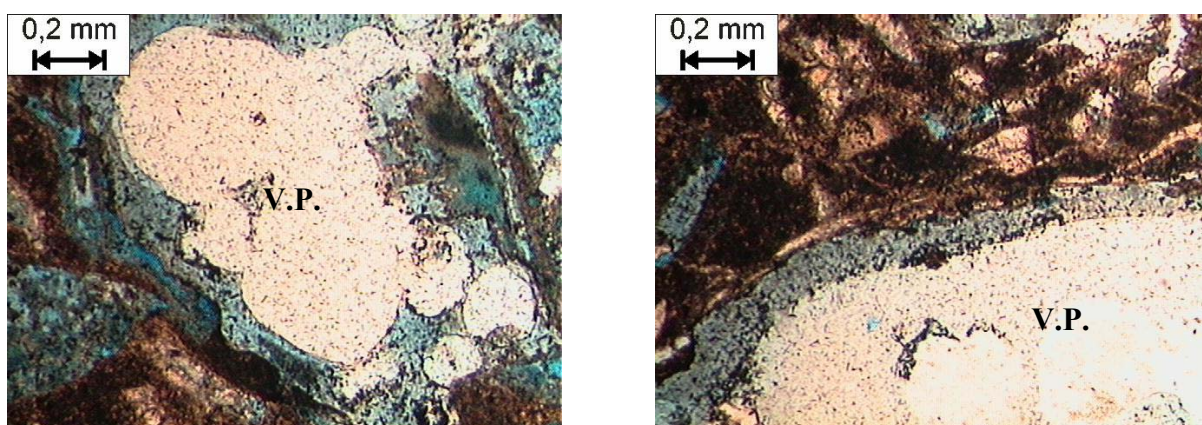


**Figura 72. Agregado fissurado preenchido com produto da reação.**

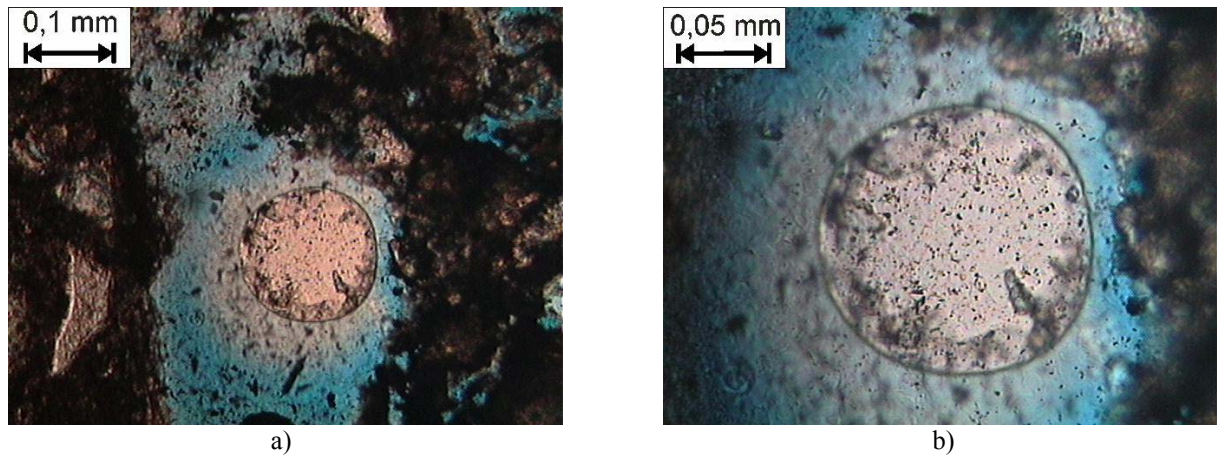
A seguir serão apresentadas as microscopias (Figuras 73 a 75) da amostra retirada do corpo-de-prova realizado com vidro pyrex que permaneceu em solução de NaOH.



**Figura 73. a) Vidro pyrex com borda de RAA. b) Poro preenchido com produto da reação, aumento de 40x.**



**Figura 74. Vidro pyrex (V.P.) com bordas de RAA, aumento de 40x.**

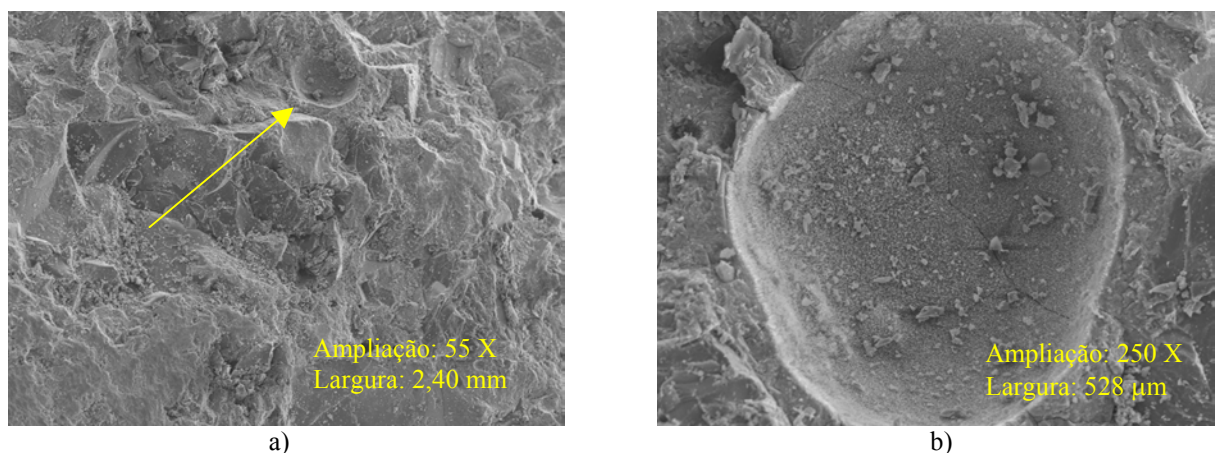


**Figura 75. a) Poro preenchido com produto da reação, aumento de 100x. b) Detalhe do poro com anel negro ao redor, aumento de 200x.**

#### 4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

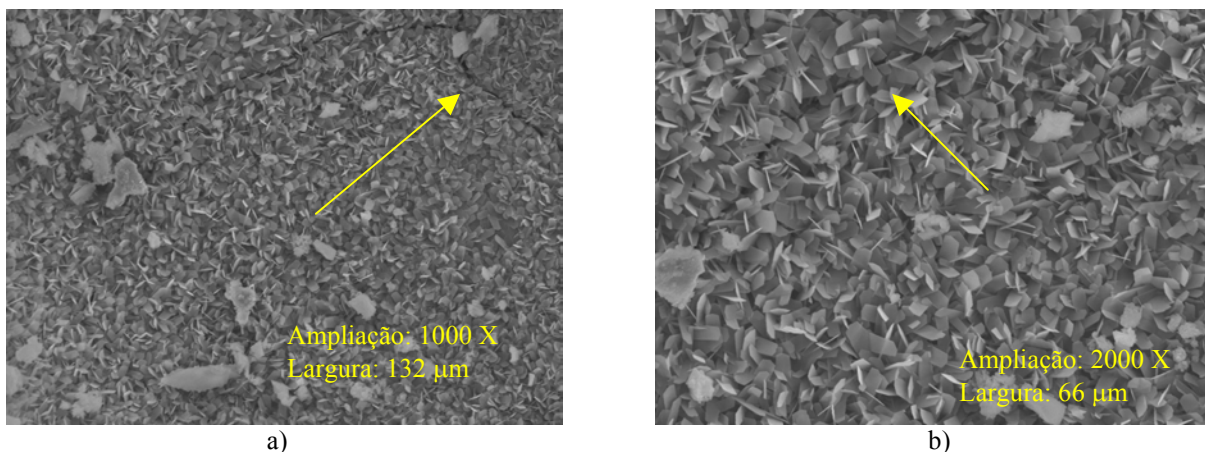
Em seguida, serão apresentadas as análises das amostras submetidas ao ensaio de microscopia eletrônica de varredura. Apresentam, na maioria, produtos com composição sílico-cálcico-alcálicos, ocorrendo variações na morfologia dos produtos visualizados.

As Figuras 76 a 78 apresentam as micrografias referentes à amostra do corpo-de-prova E1 0-1 NaOH - extraída do furo 1 da galeria de inspeção da barragem - que permaneceu em ensaio de reatividade em solução de NaOH.

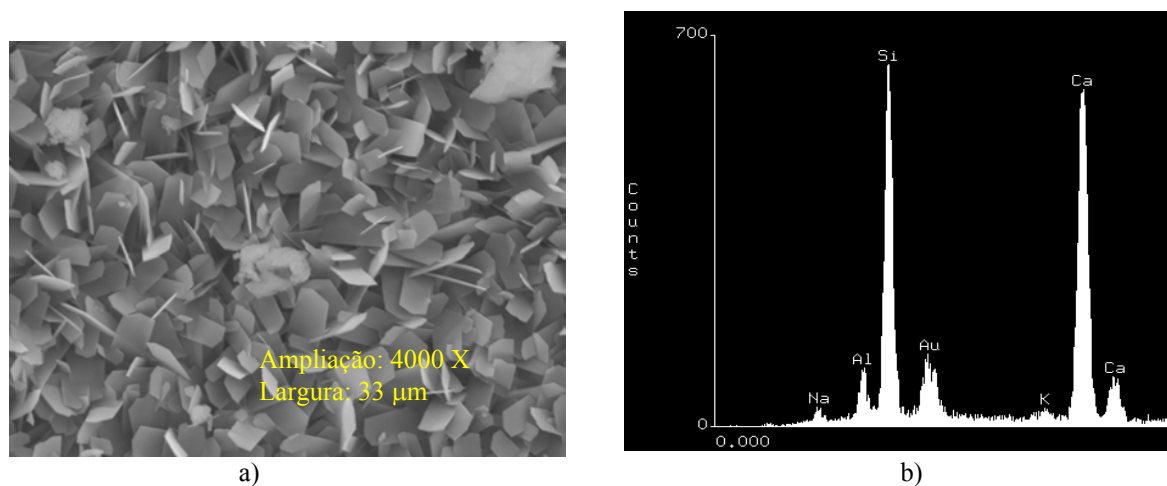


**Figura 76. a) Visão geral da amostra com poro preenchido com produto de reação. b) Vista aproximada do poro com produtos da reação álcali-agregado.**



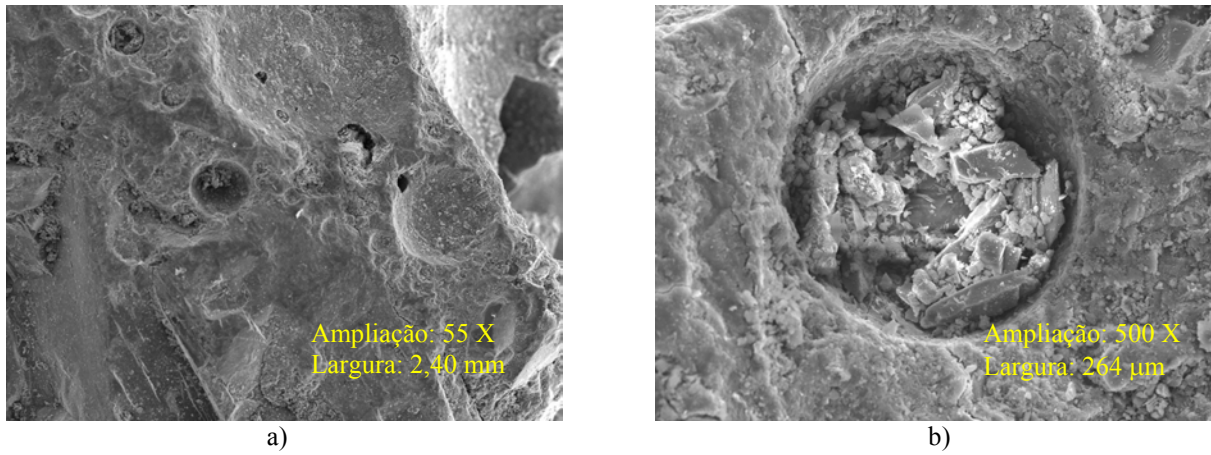


**Figura 77. a) Vista ampliada do poro (1000x) mostrando produtos da reação e fissura. b) Aproximação da imagem anterior com ampliação de 2000x mostrando “rosáceas” que preenchem totalmente o poro do concreto.**

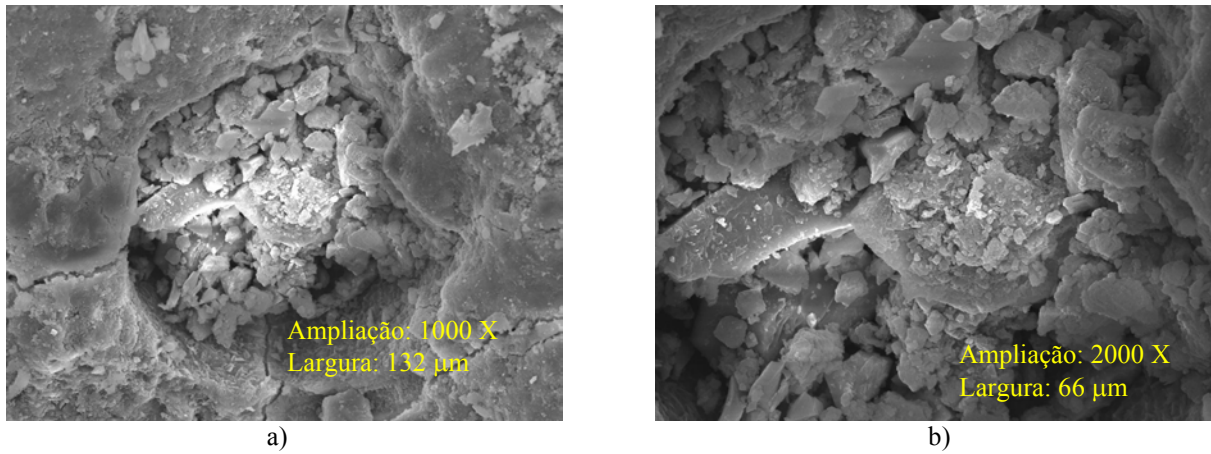


**Figura 78. a) Detalhe das rosáceas e dentro do poro. b) EDS do produto (rosáceas) que apresenta uma composição sílico-cálcico-alcalina.**

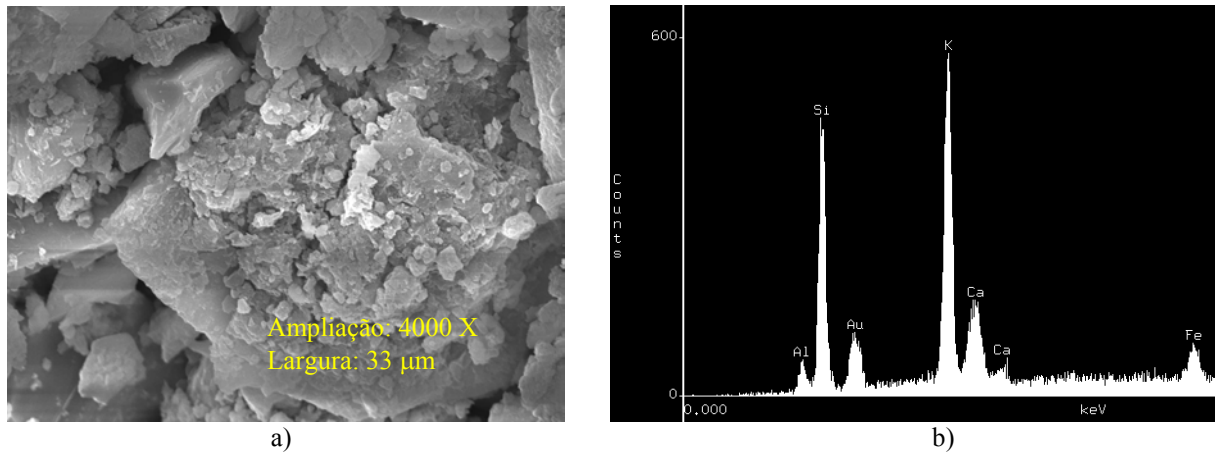
As Figuras 79 a 81 apresentam as micrografias referentes à primeira amostra do corpo-de-prova E2 0-1 NaOH - extraída do furo 2 da galeria de inspeção da barragem - que permaneceu em ensaio de reatividade em solução de NaOH.



**Figura 79.a) Visão geral da amostra (aumento de 55x). b) Detalhe do poro preenchido gel.**

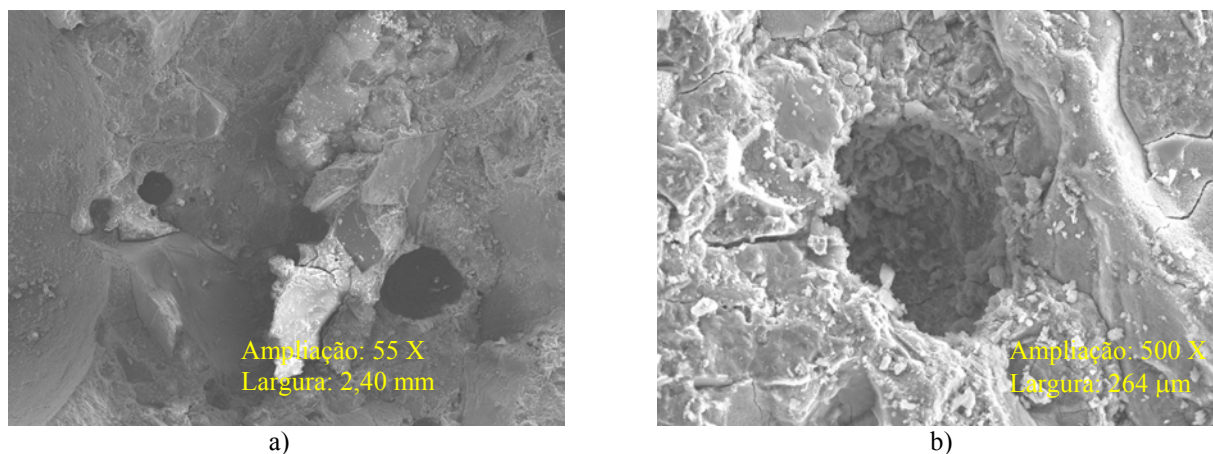


**Figura 80.a) Poro preenchido com gel. b) Detalhe da morfologia do gel gretado e botrioidal (aumento 2000x)**

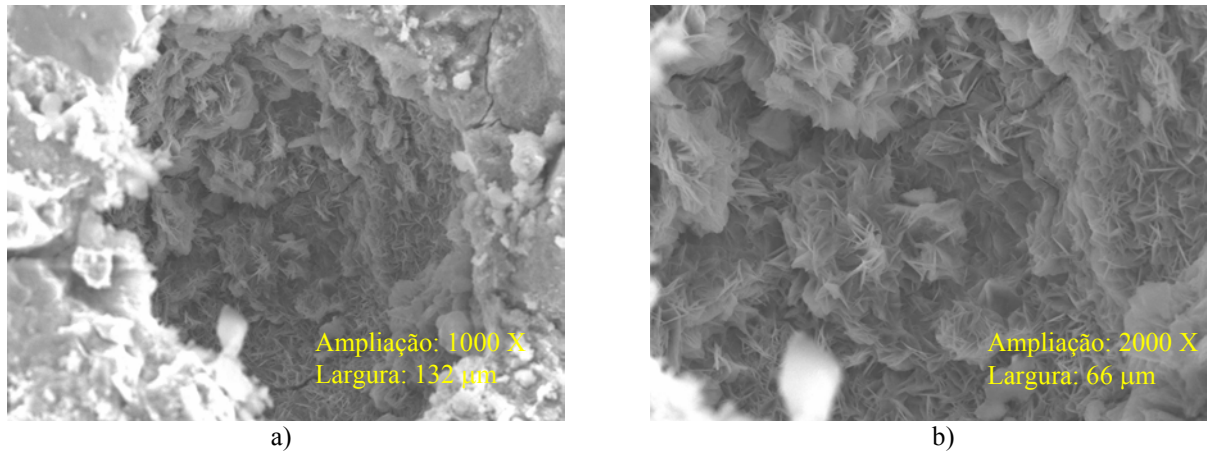


**Figura 81. a) Detalhe da morfologia do gel gretado e botrioidal (aumento 4000x) b) EDS destes produtos cristalizados no poro apresentando uma composição sílico-cálcico-potássica, com uma relação K/Ca > 1, confirmando a presença de gel.**

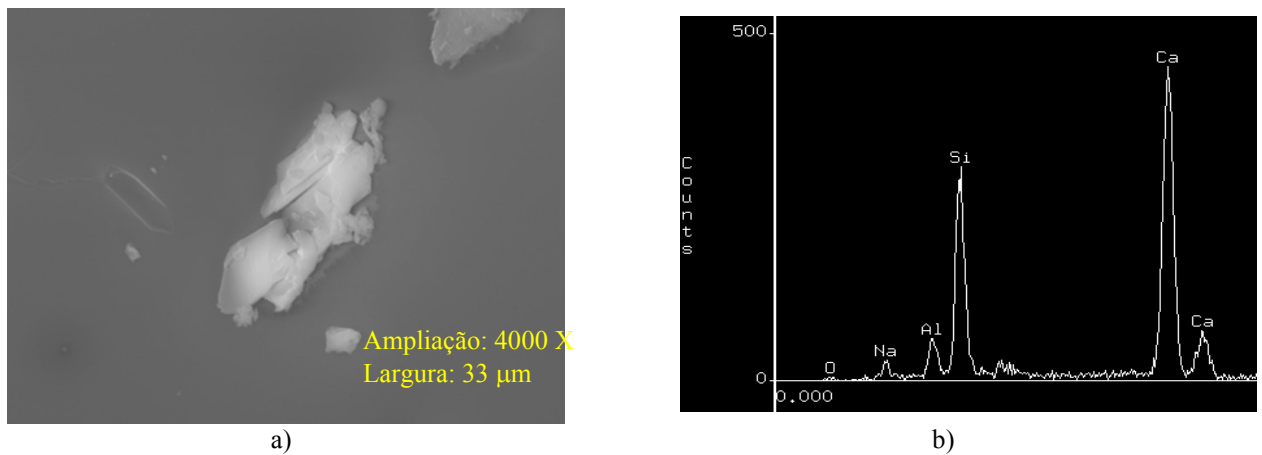
As Figuras 82 a 84 apresentam as micrografias referentes à segunda amostra do corpo-de-prova E2 0-1 NaOH - furo 2 da galeria de inspeção da barragem - que permaneceu em ensaio de reatividade em solução de NaOH.



**Figura 82. a) Visão geral da amostra (aumento de 55x) mostrando vários poros. b) Detalhe do poro preenchido com gel.**



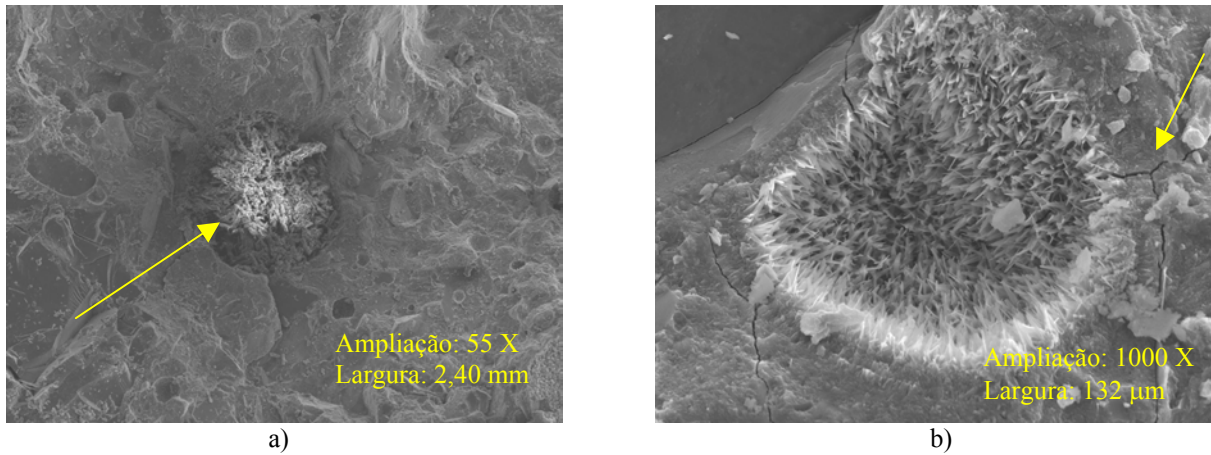
**Figura 83.a) Poro com acículas de produto cristalizado a partir do gel. b) Produtos cristalizados da RAA, formando rosáceas.**



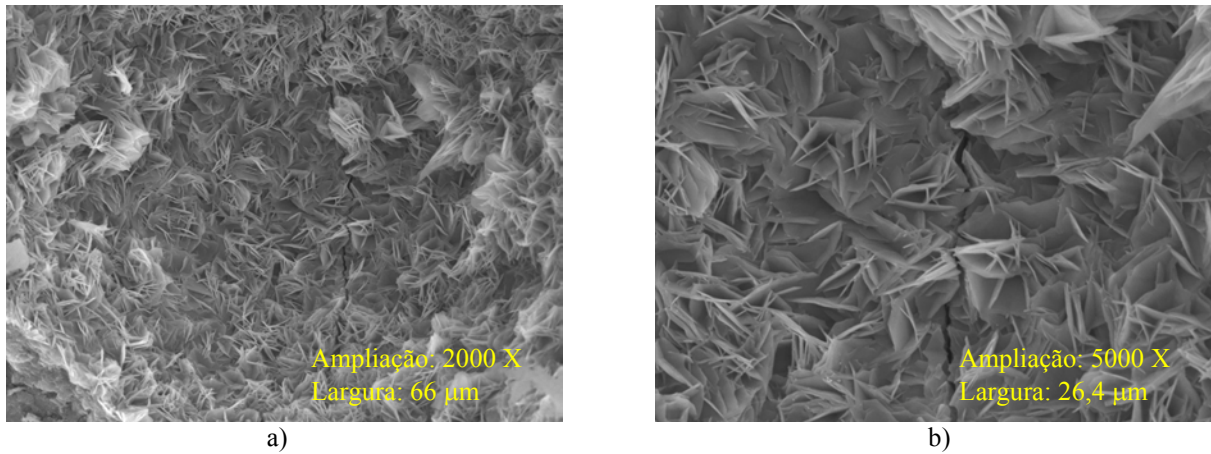
**Figura 84.a) Gel com estrutura maciça (aumento de 4000x). b) EDS do produto (rosáceas) apresentando uma composição sílico-cálcico-alcalina.**

As Figuras 85 a 88 apresentam as micrografias referentes à primeira amostra do corpo-de-prova E3 9-10 NaOH - furo 3 da galeria de inspeção da barragem - que permaneceu em ensaio de reatividade em solução de NaOH.

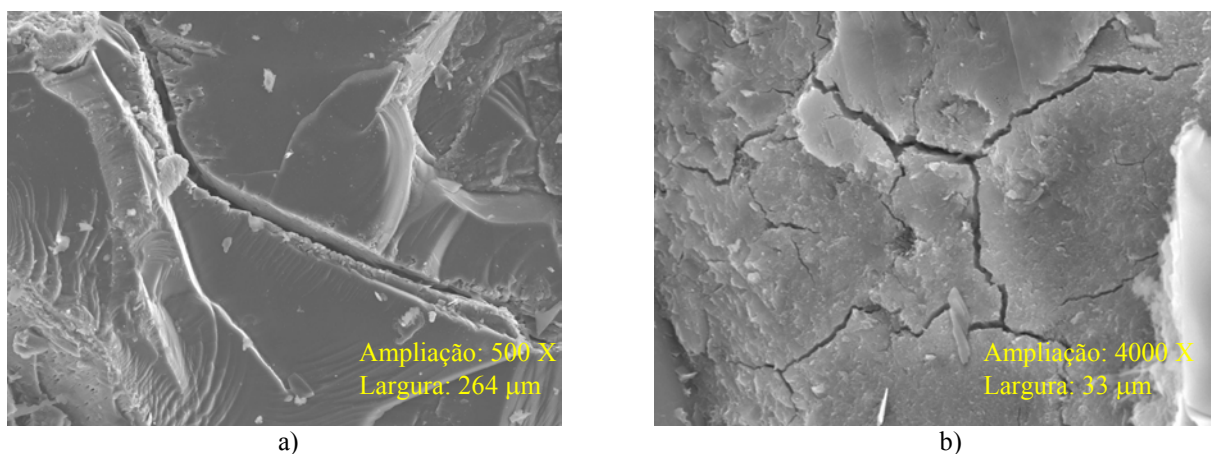




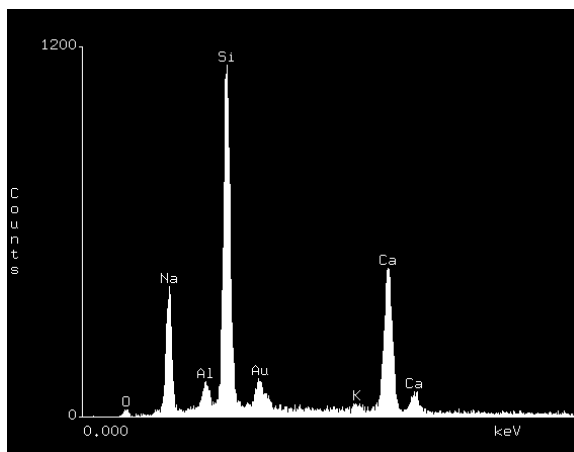
**Figura 85. a) Visão geral da amostra com poro preenchido com produto de reação. b) Aproximação da imagem anterior, mostrando fissuras saindo do poro.**



**Figura 86. a) Aproximação da imagem anterior com ampliação de 2000x mostrando “rosáceas” que preenchem totalmente o poro do concreto. b) Detalhe das rosáceas e fissura dentro do poro.**



**Figura 87. a) Agregado apresentando fissura. b) Gel maciço gretado no poro.**

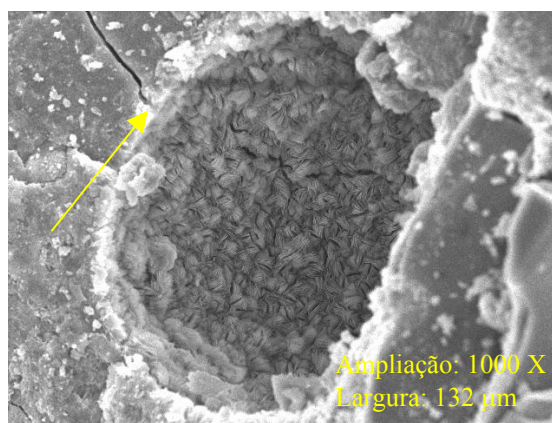


**Figura 88.**EDS do produto das Figura 87 apresentando uma composição sílico-cálcico-alcalina, confirmando a presença de gel.

As Figuras 89 a 91 apresentam as micrografias referentes à segunda amostra do corpo-de-prova E3 9-10 NaOH - furo 3 da galeria de inspeção da barragem - que permaneceu em ensaio de reatividade em solução de NaOH.

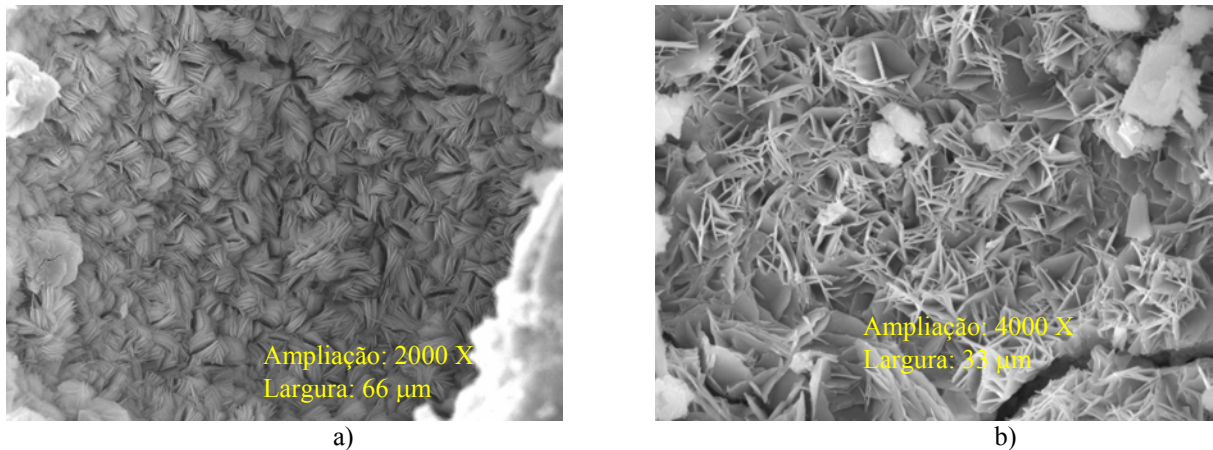


a)

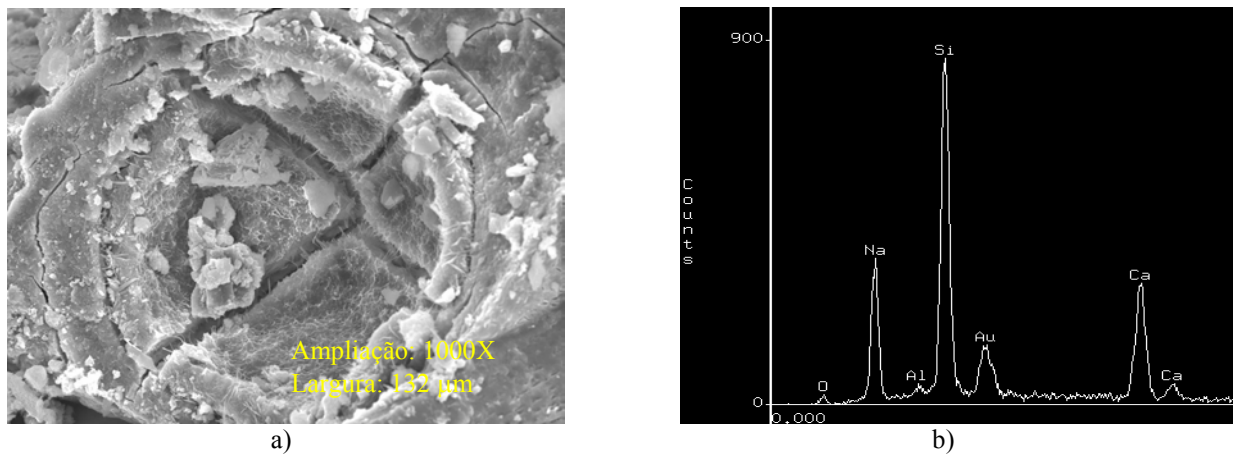


b)

**Figura 89.**a) Visão geral da amostra (aumento de 55x). b) Detalhe do poro preenchido com produto da reação e fissuras saindo do poro.



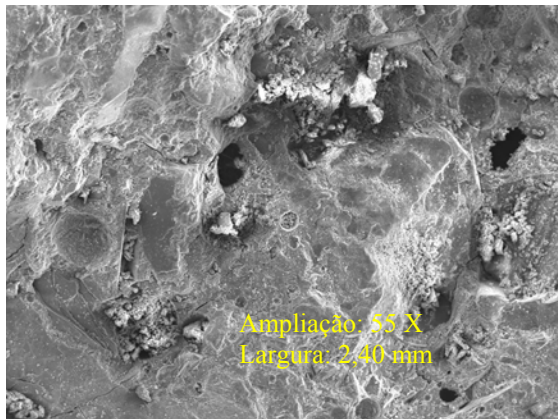
**Figura 90. a) Rosáceas no poro da Figura 89-b. b) Detalhe da morfologia dos produtos cristalizados dentro do poro.**



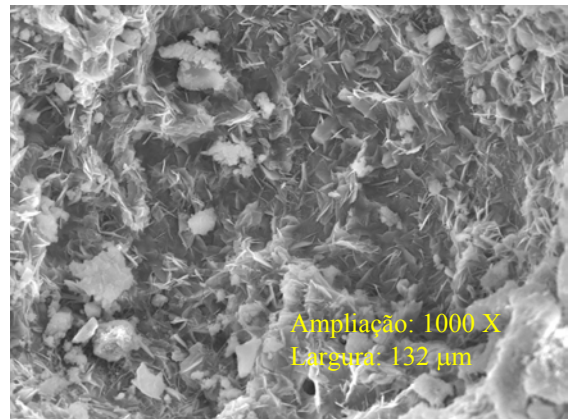
**Figura 91. a) Poro completamente revestido com gel gretado b) EDS do produto do poro apresentando uma composição sílico-cálcico-alcalina, com uma relação  $\text{Na}/\text{Ca} > 1$ , confirmando a presença de gel.**

As Figuras 92 a 94 apresentam as micrografias referentes à amostra do corpo-de-prova E3 9-10 F.E - furo 3 da galeria de inspeção da barragem - que não foi submetida ao ensaio de reatividade.



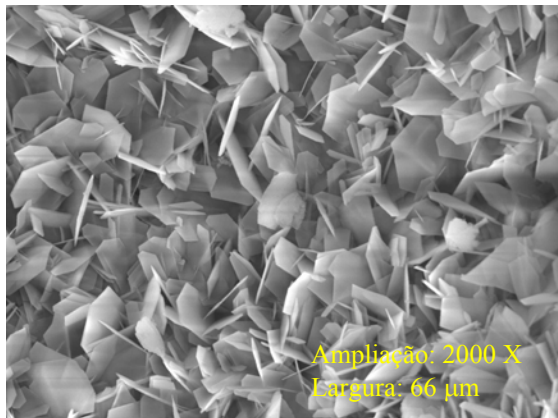


a)

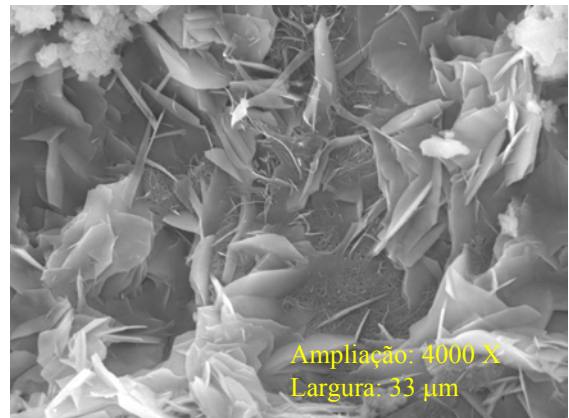


b)

**Figura 92.a) Visão geral da amostra, apresentando vários poros. b) Detalhe do poro preenchido com produto da reação.**

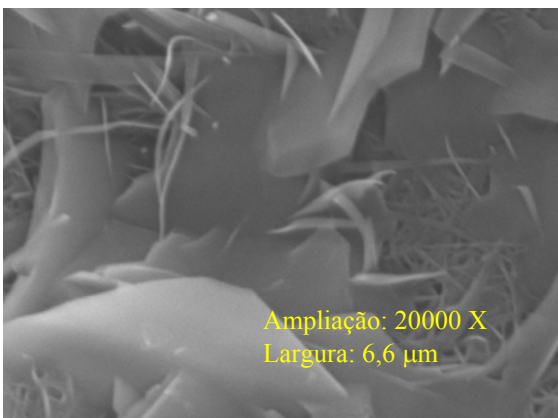


a)

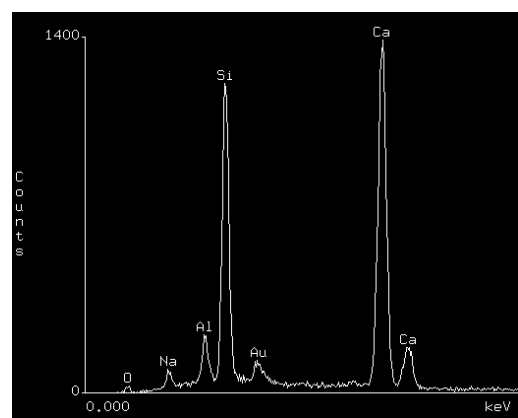


b)

**Figura 93.a) Aproximação da imagem anterior com ampliação de 2000x mostrando “rosáceas” que preenchem totalmente o poro do concreto. b) Detalhe das rosáceas.**



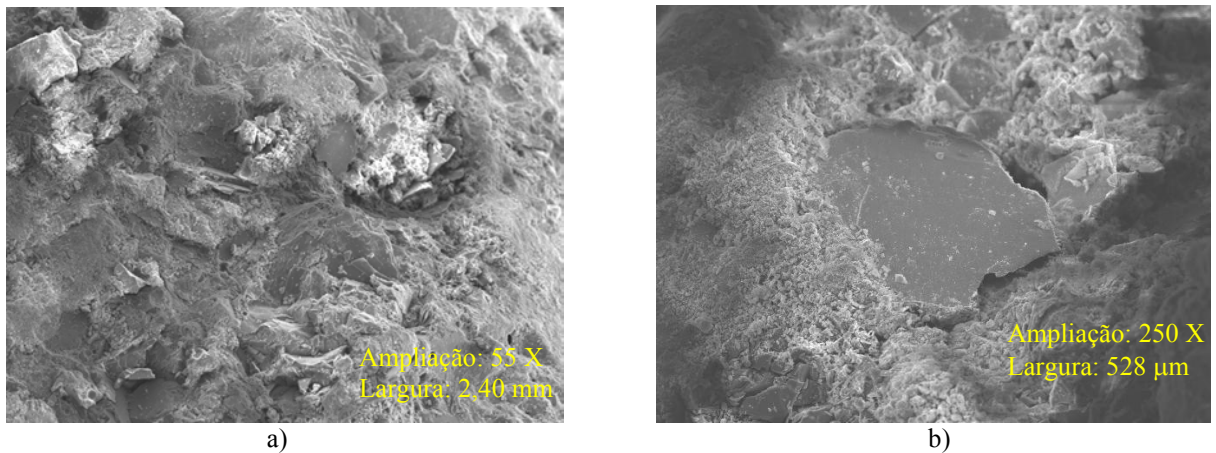
a)



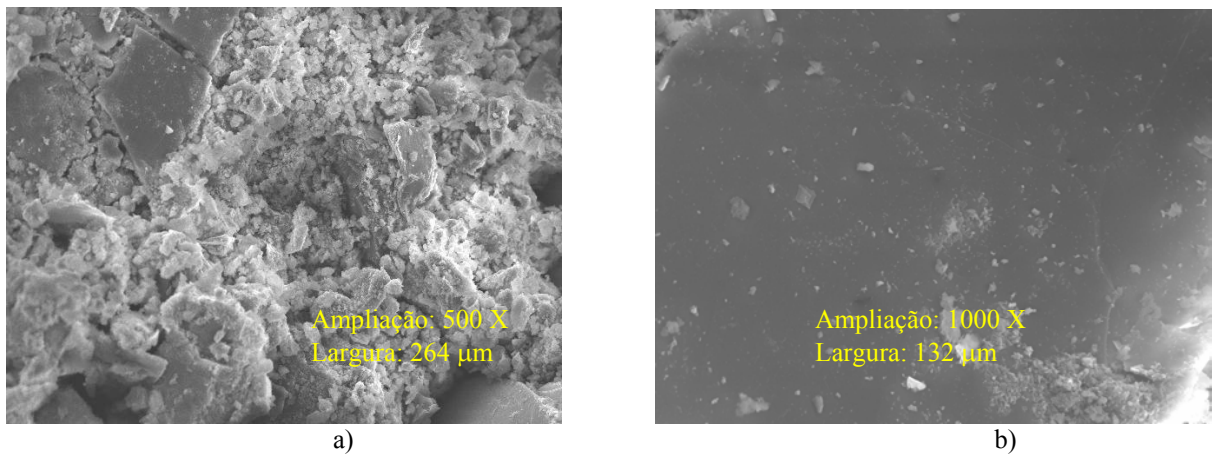
b)

**Figura 94.a) Detalhe das rosáceas (20.000x). b) EDS do produto das rosáceas.**

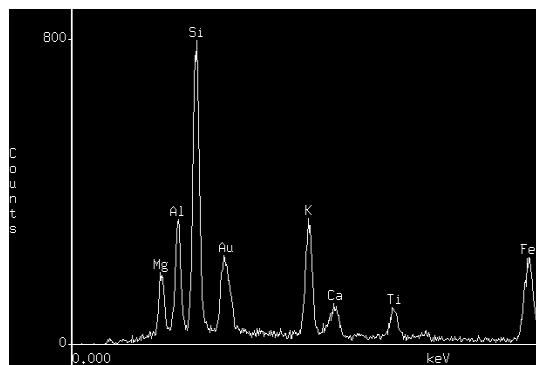
As Figuras 95 a 97 apresentam as micrografias referentes à amostra do corpo-de-prova E4 2-3c2 estufa - furo 4 da galeria de inspeção da barragem - que permaneceu em estufa a 80°C durante o ensaio de reatividade.



**Figura 95. a) Visão geral da amostra, apresentando produto da reação sobre o agregado e disperso na pasta. b) Presença de gel na interface agregado/pasta**

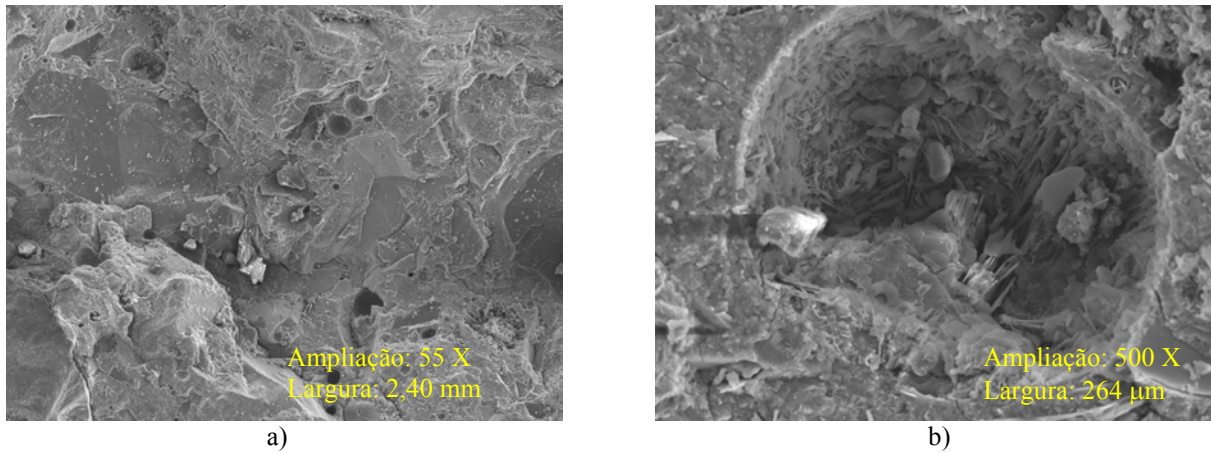


**Figura 96. a) Gel maciço e gretado sobre o agregado. b) Ampliação de 1000x do gel.**

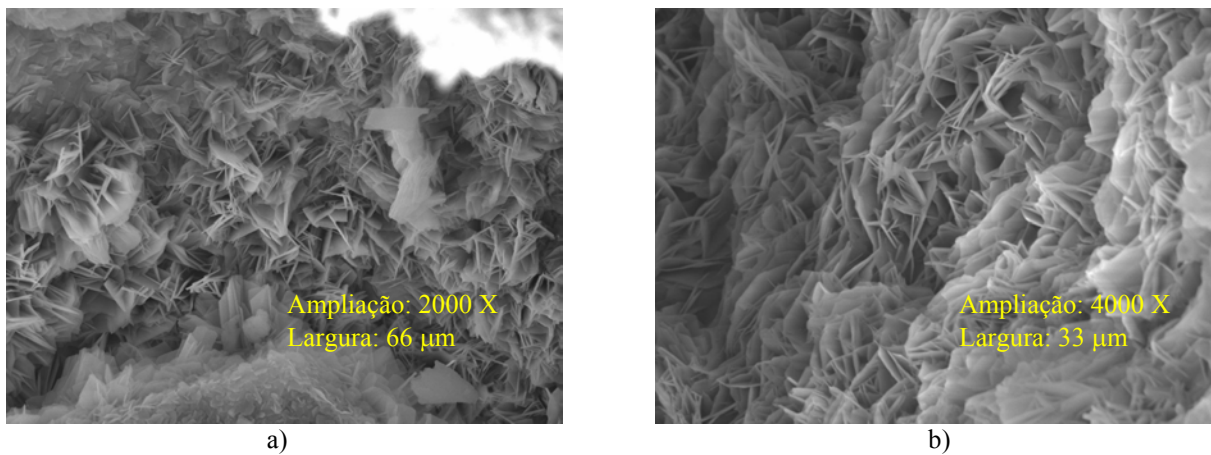


**Figura 97. EDS do gel maciço apresentando uma composição sílico-cálcico-potássica, com uma relação K/Ca > 1.**

As Figuras 98 e 99 apresentam as micrografias referentes à amostra do corpo-de-prova F5 NaOH - furo 5 da galeria de drenagem da barragem - que permaneceu em ensaio de reatividade em solução de NaOH.



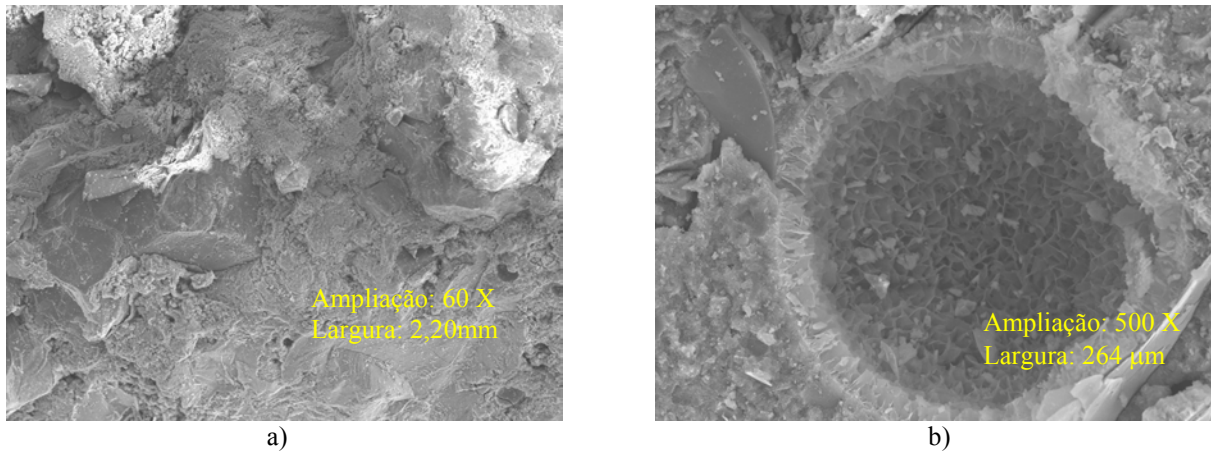
**Figura 98. a) Visão geral da amostra (aumento de 55x). b) Detalhe do poro preenchido com produto da reação e fissuras saindo do poro.**



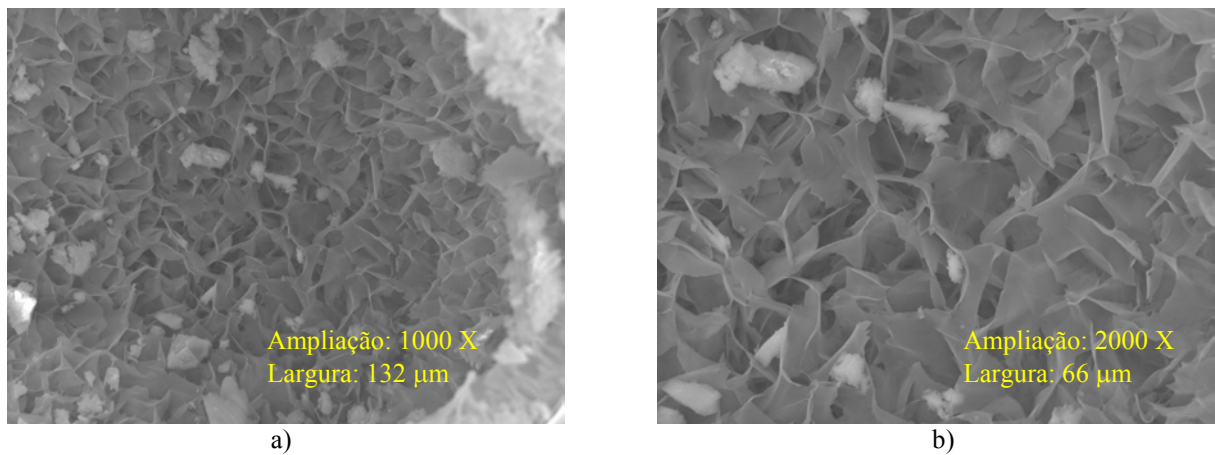
**Figura 99. Aproximação da imagem anterior com ampliação de 2000x mostrando “rosáceas” preenchendo totalmente o poro do concreto. b) Detalhe das rosáceas (4000x).**

As Figuras 100 a 101 apresentam as micrografias referentes à amostra do corpo-de-prova F5 estufa - furo 5 da galeria de drenagem da barragem- que permaneceu em estufa a 80°C durante o ensaio de reatividade.

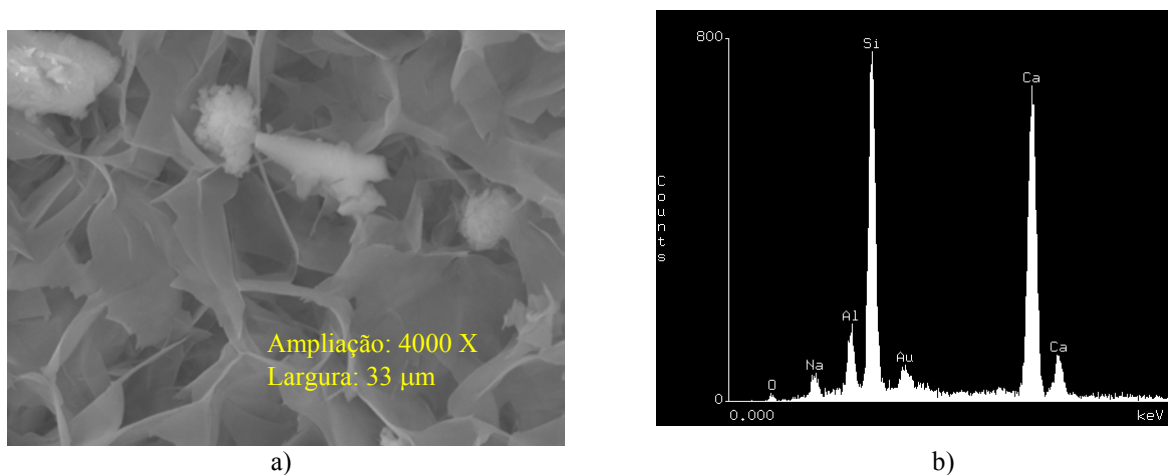




**Figura 100. a) Visão geral da amostra (aumento de 55x). b) Detalhe do poro preenchido com produto da reação e gel gretado ao redor do poro.**

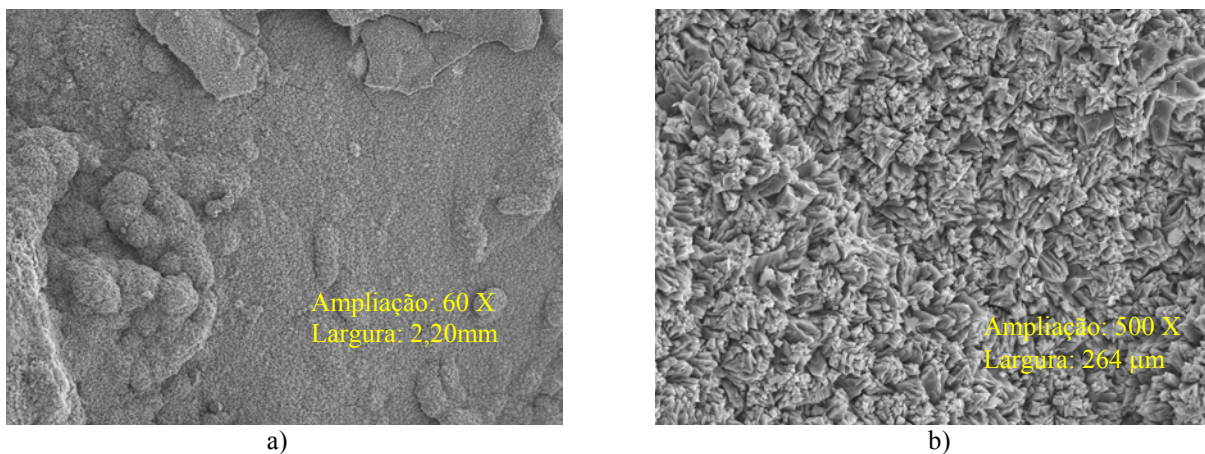


**Figura 101. a) Vista ampliada do poro (1000x), mostrando produtos da reação. b) Aproximação da imagem anterior com ampliação de 2000x, mostrando “rosáceas” que preenchem totalmente o poro do concreto.**

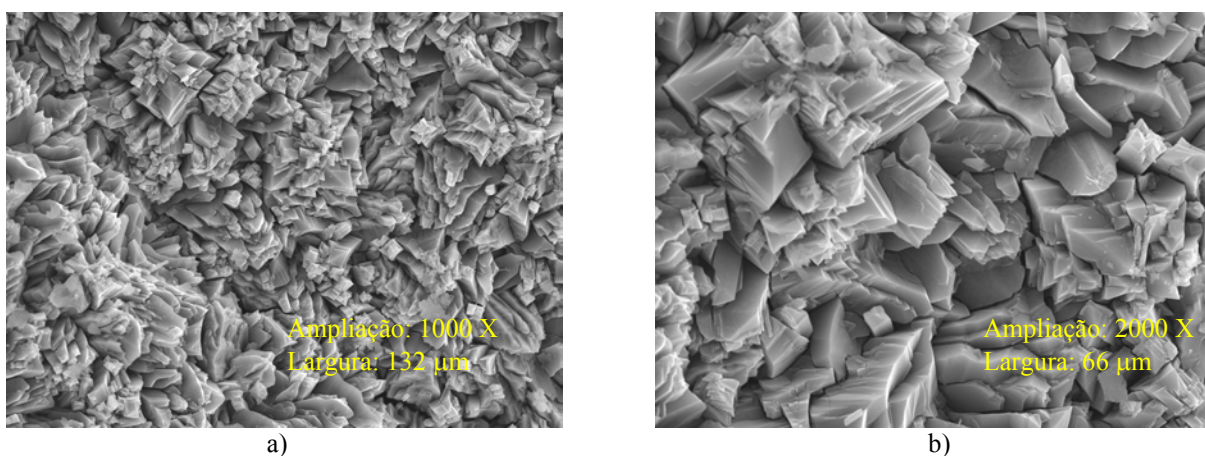


**Figura 102. a) Detalhe das rosáceas (4.000x). b) EDS do produto das rosáceas.**

A seguir, serão apresentadas as micrografias (Figuras 103 a 105) da primeira amostra retirada do corpo-de-prova realizado com vidro pyrex que permaneceu em solução de NaOH.

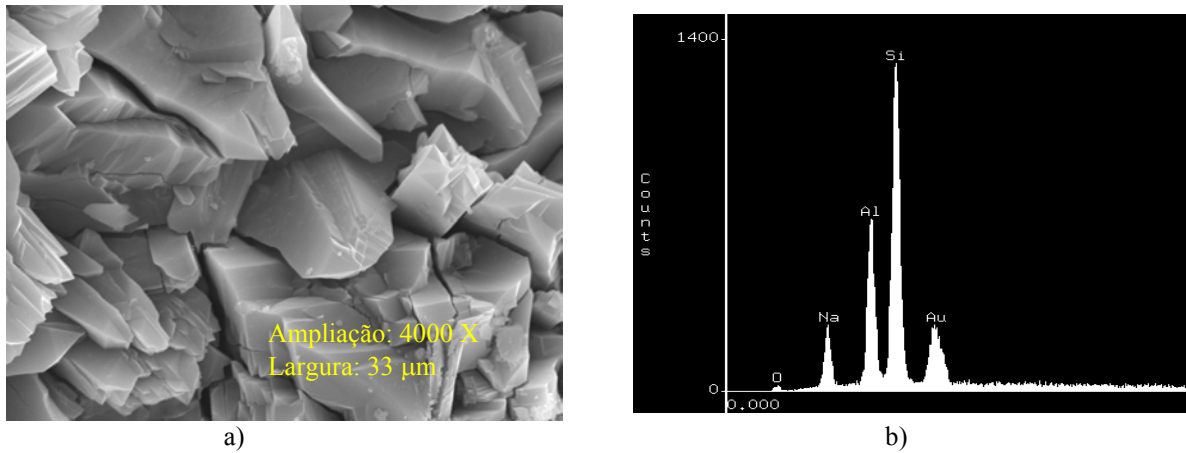


**Figura 103. a) Visão geral da amostra, inteiramente recoberta pelo produto da reação. b) Detalhe do gel formado (500x).**



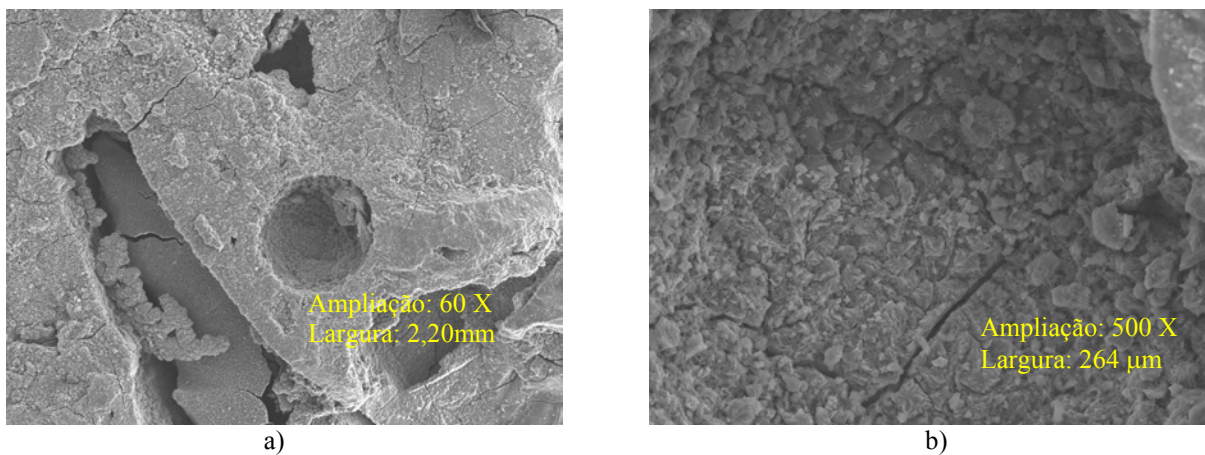
**Figura 104. a) Detalhe do gel formado (1000x). b) Detalhe do gel formado (2000x).**



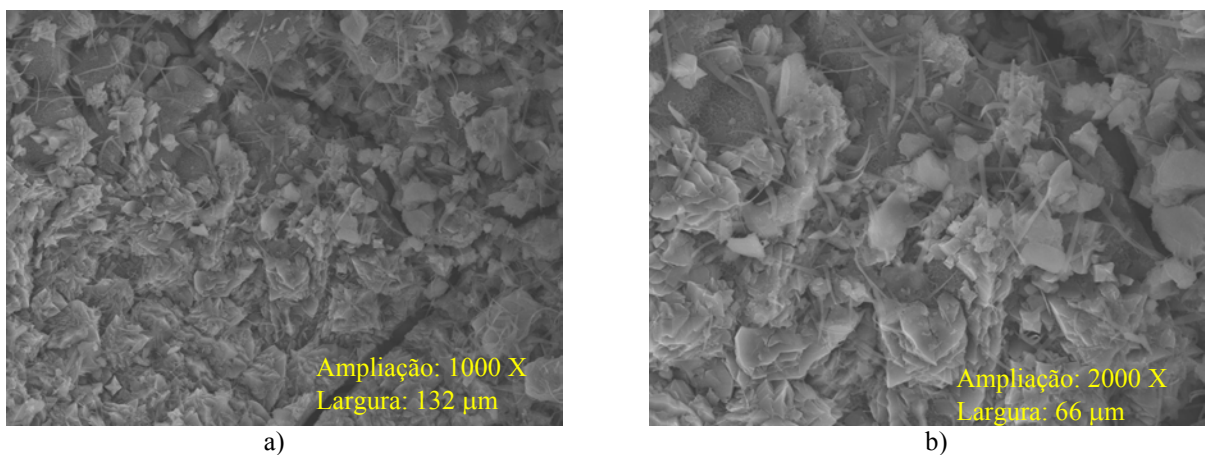


**Figura 105. a) Detalhe do gel formado (4000x). b) EDS do gel formado, apresentando uma composição sílico-aluminato-sódica.**

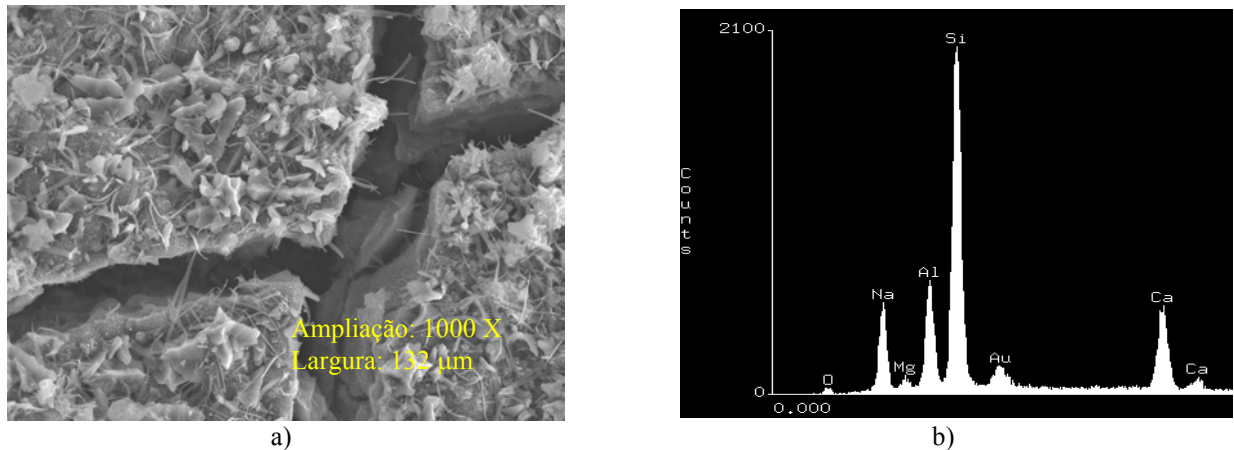
As Figuras 106 a 108 apresentam as micrografias referentes à segunda amostra retirada do corpo-de-prova realizado com vidro pyrex que permaneceu em solução de NaOH.



**Figura 106. a) Visão geral da amostra apresentando poros de grandes dimensões. b) Detalhe do gel formado (500x).**



**Figura 107. a) Detalhe do gel formado (1000x). b) Detalhe do gel formado (2000x).**



**Figura 108. a) Detalhe do gel formado (1000x). b) EDS do gel formado, apresentando uma composição sílico-aluminato-cálcico-sódica.**

Através dos ensaios realizados com o Microscópio Eletrônico de Varredura pode-se verificar a presença de produtos provenientes da reação álcali-agregado, os quais se apresentaram em diversas morfologias e regiões do concreto.

As amostras que foram submetidas ao ensaio de reatividade em solução de NaOH, apresentaram produtos com morfologia semelhante aqueles que não foram submetidos a nenhum tipo de ensaio, bem como aqueles que permaneceram em estufa. Isto mostra que a reação álcali-agregado desenvolveu-se no concreto presente na UHE e não devido ao fato do ensaio acelerado.

Confrontando-se os resultados obtidos com os ensaios de reatividade (item 4.2) com a Microscopia Eletrônica de Varredura (item 4.6), pode-se detectar a presença de RAA no concreto, porém em um estágio avançado de desenvolvimento, não comprometendo a integridade física da UHE de Macarenhas.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas por meio das análises dos resultados dos ensaios experimentais, como também sugestões para futuros trabalhos.

### **5.1 CONCLUSÕES**

Para verificar a existência de Reação Álcali-Agregado no concreto, foram realizados diversos tipos de ensaios nos testemunhos extraídos da barragem: análise macroscópica, análise microscópica em microscópio óptico de luz transmitida, microscópio eletrônico de varredura com o auxílio de espectrômetro de energia dispersa (EDS) e ensaio de reatividade acelerado. Também foram analisadas as características mecânicas do concreto através dos ensaios de compressão e módulo de elasticidade.

Com relação aos aspectos gerais e relativos à reação álcali-agregado do concreto, a análise macroscópica mostrou-se normal, podendo ser observados nos testemunhos, baixa porosidade e mistura homogênea entre os materiais constituintes. Isso caracteriza a utilização adequada da relação água/cimento, uma boa homogeneização da mistura e um correto adensamento.

Através da análise petrográfica do concreto realizado com microscópio óptico de luz transmitida, verificou-se a presença de gel expansivo na zona de interface agregado/argamassa, nos poros do concreto e nas microfissuras do agregado. Os agregados analisados apresentaram características favoráveis à reação expansiva, como ocorrência de grãos cristalizados com forte extinção ondulante, partículas subangulosas e baixa esfericidade.

Analisando os resultados obtidos através da utilização do microscópio eletrônico de varredura, pode-se concluir que a barragem em estudo apresentou produtos com morfologias e composições químicas típicas da RAA, tendo como principal produto, encontrado nos poros

do concreto e em certas ocasiões sobre o agregado, um gel gretado e botrioidal e seus produtos cristalizados, com morfologia rendada, fibras entrelaçadas, aciculares e rosáceas.

A espectrometria de energia dispersa (EDS) mostrou que os géis e os produtos cristalizados eram compostos de silício, cálcio e álcalis (sódio e /ou potássio), os quais apresentaram-se tanto no estado amorfo, relação K/Ca ou Na/Ca < 1, quanto nas morfologias e cristalizações distintas, K/Ca ou Na/Ca >1.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV), juntamente com a espectrometria de energia dispersa (EDS), mostraram ser uma ferramenta de fundamental importância para avaliação de produtos expansivos causados pela RAA.

A comparação realizada entre o ensaio de reatividade acelerado com barras de argamassa ASTM C 1260/01 e o ensaio de reatividade acelerado com corpos-de-prova cilíndricos imersos em solução apresentaram resultados satisfatórios tanto para o emprego vidro/pirex quanto para o emprego de areia. Ambos permitiram utilizar a metodologia de ensaios da ASTM C – 1260/01 para submeter os corpos-de-prova extraídos da barragem e verificar a capacidade de expansão quando submetidos a condições péssimas de tratamento.

Pelo ensaio de reatividade, notou-se que os corpos-de-prova extraídos das estruturas e submetidos a condições “péssimas” de armazenagem mostraram capacidade de expansão, com variações de comprimento de até 0,2% para os corpos-de-prova imersos em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1N. Isso mostra que existem, no concreto, substâncias que permitem continuidade da reação álcali-agregado.

Os gráficos de expansão, obtidos do ensaio de reatividade acelerado, apresentaram uma tendência à estabilização, com valores encontrados para as expansões que podem ser considerados um comportamento inócuo. Porém, ainda não são possíveis conclusões quanto ao término da reação, devendo-se estender por mais tempo os ensaios. KUPERMAN et al (1997) comentam que este prazo deve ser de 24 meses de observação, complementados com informações petrográficas dos concretos.

Foi comprovada, através dos estudos, a existência de reação deletéria do tipo álcali-silicato que pode causar fissurações devido à expansão do gel produzido, se ele estiver em condições de umidade acima de 80%.

Os resultados dos ensaios de compressão simples e módulo de elasticidade, com valores médio de 26,2 MPa e 25 GPa respectivamente, mostraram valores compatíveis com o concreto utilizado para este tipo de construção, o qual não sofreu efeitos negativos ocasionados pela reação álcali-agregado.

Mesmo detectada a RAA na barragem, pode-se notar que a mesma encontra-se em um estado perfeito de utilização, ou seja, a RAA não afetou as estruturas de concreto. Porém, análises com a instrumentação instalada na barragem, e análises laboratoriais deverão ocorrer periodicamente para verificar se não está havendo evolução no processo de reação deletéria e expansão com deslocamentos do concreto.

## **5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

A seguir, serão apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos relacionados ao tema:

- Análise das expansões dos ensaios de reatividade em idades superiores às realizadas nesta pesquisa
- Acompanhamento dos dados obtidos com a instrumentação da barragem, através da modelagem matemática, para serem correlacionados com os resultados dos ensaios laboratoriais realizadas nesta pesquisa
- Realização do ensaio de reatividade em condições diversificadas a esta pesquisa, tais como temperaturas de 40° C a 60 ° C e/ou com solução de hidróxido de potássio (KOH).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI COMMITTEE 234. Guide for the use of silica filme in concreto. **ACI Materials Journal**, v.92, n.4, p.437-440, 1995.
- ALVES, E. F. R.; PIMENTA, M. A.; NASCIMENTO, O. L.; ANDRADE W. P. **Ensaio acelerados em testemunhos de concreto.** . In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997a. p.103-110.
- ANDRIOLO, F. R. **Ensaio para avaliação da potencialidade dos materiais quanto à reação álcali-agregado e ações decorrentes.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997a, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997a. p.35-43.
- ANDRIOLO, F. R. **Observação de estruturas de concreto: validade quanto a ocorrência da reação álcali-agregado.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997b, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997a. p.243-263.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-227/90. Standard test method for potencial alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method).** Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.125-129.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-289/94 Standard test method for potencial alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method).** Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.156-162.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM c-295/9a Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete.** Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.173-180.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-441/96 Standard test method for effectiveness of mineral admixtures or ground blast-furnace slag in preventing excessive expansion of concrete due to the alkali-silica reaction,** Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.222-224.

- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-586/92. Standard test method for potencial alkali reactivity of carbonate rocks for concrete aggregates (rock cylinder method)**. Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.283-286.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-618/97. Standard especificafion for coal fiy ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in concrete**. Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.294-296.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-656/95. Standard practice for petrographic examination of hardened concrete**. Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.406-420.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1105/95. Standard test method for length concrete due to alkali-carbonate rock reaction**, Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.569-572.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM C-1260/94. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)**. Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.647-650.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1293/95. Standard test method for concrete aggregates by determination of length change of concrete due to alicali-silica reaction**. Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrote and Aggregates), p.651-656.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 9773/87. Agregado – Reatividade potencial de álcalis em combinações cimento-agregado**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9774/87. Agregado - Verificação da reatividade potencial pelo método químico**. Rio do Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10340/88. Agregados - Avaliação da reatividade potencial das rochas carbonáticas com os álcalis de cimento**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12651/92. Materiais pozolânicos - Determinação da eficiência de materiais pozolânicos em evitar a concreto devido à reação álcali-agregado**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653/92. Materiais pozolânicos - Especificação**. Rio de Janeiro, 1992.

- BICZOK, I. **Corrosion y protección del hormigon**. Trad de Emilio J. d'Ocon Asensi. Bilbao/España: Ediciones Urmo, 1972. p.275-280.
- BULLETIN 79 - **Alkali-Aggregate Reaction In Concrete Dams -Review And Recomendations**. Paris: CIGB/ICOLD, 1991.
- CASTRO, C. H.; SANTOS, M. C.; TRABOULSI, M. A.; BITTENCOURT, R. M. **Influência do agregado pulverizado na reação álcali-agregado**. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. Anais... Goiânia, 1997, p.87-94.
- COLLINS, R. J.; BAREHAM, P. D. **Alkali-silica reaction: suppression of expansion using porous aggregate**. Cement and Concrete Research, v.17, n.1, p.89-96, 1987.
- DENG, M.; TANG, M. **Mechanism of desdolomitization and expansion of dolomitic rocks**. Cement and Concrete Research, v.23, n.6, p.1397-1408, 1993.
- DIAMOND, S. **A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms - 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions**. Cement and Concrete Research, v.5, p.329-345, 1975.
- GAMBALE, E. A.; VEIGA, F. N.; FONTOURA, J. T. F.; ANDRADE, W. P. **Estudo comparativo de resultados de ensaios de reatividade por diferentes métodos de ensaios**. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997. p.61-68.
- GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. **The chemistry of 'alkali-aggregate' reaction**. *Cement and Concrete Research*, v. 11, n. 1, p.1-9, 1981 a.
- GRATTAN-BELLEW, P. E. **Laboratory evaluation of alkali-silica reaction in concrete from Saunders Generating Station**. ACI Materials journal, v.92, n.2, p.126-134, 1995.
- HASPARYK, N. P.; GONÇALVES, I. N.; VEIGA, F. N. **Reação álcali-agregado: a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos**. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, VI CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 1997, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFROS.CPGEC, 1997. v.1, p.655-662.
- HASPARYK, N. P.; ARMELIN, J. L.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI, W. **Investigação da reação álcali-agregado em testemunhos de concreto através da microscopia eletrônica de varredura**. In: III CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 1998, Juiz de Fora. Anais.. Juiz de Fora: UFJF, 1998. p.437-446.
- HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. Goiânia, 1999. 257p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil.



- HOOBS, D. W. **Influence of pulverized-fuel ash and granulated blastfurnace slag upon expansion caused by the alkali-silica reaction.** Magazine of Concrete Research, v.34, n.119, p.83-94, 1982.
- KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos.** In: 1º SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986, São Paulo. Anais... São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986, p.127-138.
- KIHARA, Y. **A influência da carbonatação no mecanismo de expansão de reação álcali-agregado.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997. p.161-164.
- KIHARA, Y.; SBRIGHI NETO, C.; KUPERMAN, S. C. **Reação álcali-agregado: visão atual e a situação brasileira.** In: SIMPÓSIO SOBRE DURABILIDADE CONCRETO, 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: IBRACON/USP, 1998.
- KUPERMAN, S. C.; VIEIRA, S. R. S. S., FERREIRA, W. V. F., TIBA, R. **Tentativas para determinação do término da reação álcali-agregado na estrutura de uma tomada d'água.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997. p.129-136.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais.** São Paulo: Ed. Pini, 1994.
- MEHTA, P. K. **Properties of blended cements made from rice husk ash.** Journal of the American Concrete Institute (ACI), n.9, p.440-442, 1997.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Trad. Eng Salvador E. Giammusso. São Paulo: Ed. Pini, 1997.
- NIXON, P. J.; GAZE, M. E. **The use of fly-ash and granulates blastfurnace slag to reduce expansion due to alkali-aggregate reaction.** In: 5<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 1982, Cape Town, Proceedings...Pretoria: NATIONAL BUILDING RESEARCH INSTITUTE, 1981. paper S252/32, p.1-10.
- OBERHOLSTER, R. E.; VAN AARDT, J. H. P.; BRANDT, M. P. **Durability of cementitious systems.** In: STRUCTURES AND PERFORMANCE CEMENT, 1983, London: P. Barnes, APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD, 1983. p.380-397.
- PAPPALARDO JUNIOR, A. **Uma metodologia para a modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado.** São Paulo, 1998. 180p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

- PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto**. São Paulo, 1981. 114p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- PAULON, V. A.; CAVALCANTI, A. J. **Akali-aggregate reaction at Moxotó Dam**. In: 7<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 1986, Ottawa/Canada. Proceedings... 1986, p.1-5.
- PAULON, V. A.; ARMELIN, J. L. **Diagnóstico e recuperação de barragem apresentando reação álcali-agregado**. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997. p.197-202.
- PREZZI, M. **Mechanisms of, alkali-aggregate reaction**. Berkeley, 1995. Tese (Doutorado) - University of California, Department of Civil Engineering.
- PREZZI, M.; KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; SANTOS, M. C.; ANDRADE, W. P. **Importância da química de superfície na reação álcali-agregado**. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. Anais... Goiânia, 1997, p.173-196.
- PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. **The alkali-silica reaction, Part I: use of the doublé-layer theory to expalin the behaviour of reaction-products gels**. ACI Materials Journal, v.94, n.1, p.10-17, 1997.
- RAMACHANDRAN, V. S. **Alkali-aggregate expasion inhibiting admixtures**. INSTITUTE FOR RESEARCH IN CONSTRUCTION, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1998, Cement and Concrete Composities, 1998, p. 149-161.
- RODRIGUES, E. P.; KIHARA, Y.; SBRIGHI, C. N. **A reatividade álcali-agregado de rochas “granitóides” e “quartzíticas”: proposta de índice de reatividade potencial**. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. Anais... Goiânia, 1997, p.151-159.
- ROBERTS, L. R. **Microssílica in concrete, I** – Materials Science of Concrete I. Westerville, OH, The Amerriican Ceramic Society, Inc., 1989. p. 197-220.
- SHAYAN, A; DIGGINS, R.; IVANUSEC, I. **Effectiveness of fly-ash on preventing deleterious expansion due to alkali-aggregate reaction in normal and steam-cured concrete**. Cement and Concrete Research, v.26, n.1, p.153-164, 1996.
- SILVEIRA, J. F. A. **Parecer técnico sobre as estruturas de concreto da Usina Hidroelétrica de Furnas** - Relatório FR-01/96-RO, Goiânia: FURNAS Centrais Elétricas S. A., 1996.
- SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1.997, Goiânia. Anais... Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997.

- STANTON, T. E. **Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate.** *Proceedings of American Society of civil Engineers*, Dec. 1940, p. 1781-1811.
- TOMOSAWA, F; TAMURA, K.; ABE; M. **Influence of water content of concrete on alkali-aggregate reaction.** In: 8<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION (8<sup>TH</sup> ICAAR), 1989, Kyoto. *Proceedings...* Kyoto, 1989. P.881-885.
- TURRIZIANI, R. **Internal degradation of concrete: alkali-aggregate reaction, reinforcement steel corrosion.** In: 8<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 1986, Rio de Janeiro, *Proceedings...* Rio de Janeiro, 1986. v.1, p.388-442.
- VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativo do Estado de São Paulo.** Campinas, 2002. 213p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.
- VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S. **Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions.** *Cement and Concrete Research*, v. 7, n.6, p.643-648, 1977a.
- VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; ARMELIN, J. L.; ANDRADE, N. P. H. **Reação álcali-agregado: a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...*Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997. p.13-20.
- VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; ANDRADE, N. P. H. **Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidrelétrica.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...*Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997. p.69-79.
- VIEIRA, S. R. S. S. **Investigações das reações álcali-agregado em concreto.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...*Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997. p.143-150.
- VIVIAN, H. E. **Studies in cement-aggregate reaction, XIX: The effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate.** *Australtan Journal of the Applied Science*, v.2, p.488-494, 1951.
- XU, Z.; HOOTON, R. D. **Migration of alkali ions in mortar due to several mechanisms.** *Cement and Concrete Research*, v.23, n.4, p.951-961, 1993.
- ZHANG, M. H.; MALHORTA, V. M. **High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material.** *ACI Materials Journal*, v. 93, n.6, p.629-636, 1996.